



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PENENTUAN LOKASI GANGGUAN MENGGUNAKAN  
PENDEKATAN URUTAN KEDIP TEGANGAN PADA SISTEM  
DISTRIBUSI BERBASIS *GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*  
(GIS)**

Mohammad Indrawan Gunartono  
NRP 2213100145

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PENENTUAN LOKASI GANGGUAN MENGGUNAKAN  
PENDEKATAN URUTAN KEDIP TEGANGAN PADA SISTEM  
DISTRIBUSI BERBASIS *GEOGRAPHICAL INFORMATION  
SYSTEM* (GIS)**

**Mohammad Indrawan Gunartono  
NRP 2213100145**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017**

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---



**FINAL PROJECT - TE 141599**

**FAULT LOCATION DETECTION USING RANKING  
APPROACH OF VOLTAGE SAGS ON DISTRIBUTION SYSTEM  
BASED ON GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (GIS)**

**Mohammad Indrawan Gunartono  
NRP 2213100145**

**Supervisors  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017**

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “Penentuan Lokasi Gangguan Menggunakan Pendekatan Urutan Kedip Tegangan pada Sistem Distribusi Berbasis *Geographical Information System (GIS)*” adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 4 Juni 2017

Mohammad Indrawan Gunartono  
NRP. 2213100145

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

**PENENTUAN LOKASI GANGGUAN MENGGUNAKAN  
PENDEKATAN URUTAN KEDIP TEGANGAN PADA SISTEM  
DISTRIBUSI BERBASIS GEOGRAPHICAL INFORMATION  
SYSTEM (GIS)**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**



**Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc.**

**Ph.D.**

**NIP. 194907151974421001**

**Dosen Pembimbing II**



**Ir. Ni Ketut Aryani, MT.**

**NIP. 196509011991032002**





--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

# **PENENTUAN LOKASI GANGGUAN MENGGUNAKAN PENDEKATAN URUTAN KEDIP TEGANGAN PADA SISTEM DISTRIBUSI BERBASIS *GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (GIS)***

Nama : Mohammad Indrawan Gunartono  
NRP : 2213100145  
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

## **ABSTRAK**

Gangguan hubung singkat dapat mengakibatkan kerugian, baik bagi pihak konsumen, maupun pihak penyedia listrik. Kerugian dapat diminimalkan dengan penentuan lokasi gangguan secara cepat. Gangguan hubung singkat yang terjadi di suatu titik akan mengakibatkan terjadinya kedip tegangan pada sistem kelistrikan. Beberapa perkiraan daerah gangguan hubung singkat dapat ditentukan berdasarkan kedip tegangan yang terjadi. Jarak lokasi gangguan dapat ditentukan dari beberapa perkiraan daerah yang sudah diurutkan berdasar kedip tegangan. Hasil kemudian diimplementasikan menggunakan *Geographical Information System (GIS)* aset pemetaan PLN Area Distribusi Jawa Timur, sehingga dapat memberikan hasil perkiraan jarak lokasi gangguan dengan tampilan yang informatif dalam segi keruangan.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, didapatkan nilai *error* untuk setiap kali pengujian. Nilai rata-rata *error* untuk pengujian pada hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, tiga fasa ke tanah, dan antar fasa secara berurutan adalah sebesar 3,4626%, 1,7801%, 0,288%, dan 2,0309%.

**Kata Kunci:** Gangguan Hubung Singkat, Kedip Tegangan, *Geographical Information System (GIS)*, Perkiraan Jarak Lokasi Gangguan.

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

# **FAULT LOCATION DETECTION USING RANKING APPROACH OF VOLTAGE SAGS ON DISTRIBUTION SYSTEM BASED ON GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (GIS)**

Name : Mohammad Indrawan Gunartono  
NRP : 2213100145  
Supervisor 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Supervisor 2 : Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

## **ABSTRACT**

Short circuit faults can result in disadvantages, both to the consumer, and to the electricity provider. The disadvantages can be minimalize by detecting fault location quickly. Short circuit faults that occur at a point will result in the occurrence of voltage sags on the electrical system. Some estimates of short circuit region can be determined based on the voltage sags. The distances of the fault location can be determined from the approximate regions that have been sequenced based on the voltage sags. The results are then implemented by using Geographical Information System (GIS) of mapping assets of PLN East Java Distribution Area, so as to give an approximate distance of fault location with an informative view in terms of spatial.

Based on the research done, the error value obtained for each time testing. The largest error values for testing on short-circuit single line to ground, double line to ground, three phase to ground, and line to line are 3.4626%, 1.7801%, 0.288%, and 2.0309% respectively.

**Keywords:** Short Circuit Faults, Voltage Sags, Geographical Information System (GIS), Estimation of Fault Location Distance.

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas segala rahmat dan Hidayah-Nya, penelitian dan penulisan tugas akhir dengan judul **“Penentuan Lokasi Gangguan Menggunakan Pendekatan Urutan Kedip Tegangan pada Sistem Distribusi Berbasis Geographical Information System (GIS)”** ini dapat diselesaikan dengan baik.

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini banyak kendala yang penulis alami, namun berkat doa, nasihat, bimbingan, bantuan dari berbagai pihak dan berkah dari Allah SWT sehingga semua kendala yang ada dapat diatasi oleh penulis. Dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Kedua Orang tua tercinta, serta seluruh anggota keluarga yang telah banyak memberikan perhatian, dukungan, semangat, dan doa kepada penulis.
2. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D dan Ibu Ir. Ni Ketut Aryani, MT selaku dosen pembimbing 1 dan II yang telah memberi banyak ilmu dan arahan, semoga bapak dan ibu sehat selalu dan diberi keberkahan ilmu.
3. Seluruh dosen Jurusan Teknik Elektro – ITS, yang telah banyak memberikan ilmu serta motivasi.
4. Seluruh keluarga besar Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik, Bapak Ibu dosen, member S3 dan S2, serta seluruh asisten dan trainee yang telah banyak bertukar ilmu, berbagi tawa, dan keceriaannya.
5. Tim peneliti dan pengembang GIS (Febri, mbak Indri, mas Thoriq, mas Rochman, dan mas Wildan) yang telah banyak memberikan masukan, bantuan dan motivasi, sukses selalu untuk kita semua teman-teman.
6. Teman-teman e53 yang telah percaya dan memberikan semangat kepada penulis dan pihak-pihak lain yang belum dapat penulis sebutkan satu per satu.

Dalam menyusun tugas akhir ini, penulis berharap semoga nantinya tugas akhir ini bermanfaat jikalau ada kekurangan, saran serta kritik penulis harapkan, terima kasih.

Surabaya, 4 Juni 2017

Penulis

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan .....	2
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Metodologi .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
1.7 Relevansi dan Manfaat .....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.1 Sistem Distribusi .....	7
2.1.1 Sistem Distribusi Radial .....	7
2.1.2 Sistem Distribusi <i>Loop</i> .....	8
2.1.3 Sistem Distribusi Jaring-Jaring .....	8
2.1.4 Sistem Distribusi <i>Spindle</i> .....	9
2.2 Beban .....	10
2.3 Analisis Aliran Daya 3 Fasa Seimbang Menggunakan Metode <i>backward forward</i> .....	10



2.4 Analisis Gangguan Hubung Singkat pada Sistem Distribusi 3 Fasa Seimbang Topologi Radial .....	13
2.4.1 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah .....	14
2.4.2 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah .....	16
2.4.3 Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah .....	17
2.4.4 Hubung Singkat Antar Fasa .....	18
2.5 Kedip Tegangan .....	19
2.6 Estimasi Lokasi Gangguan .....	20
2.6.1 Penentuan Daerah Gangguan .....	21
2.6.2 Pendekatan Urutan .....	21
2.6.3 Perhitungan Jarak Titik Gangguan .....	23
2.7 Sistem Informasi Geografis.....	23
<b>BAB 3 PEMODELAN SISTEM.....</b>	<b>25</b>
3.1 Penggunaan Sistem Informasi Geografis .....	25
3.2 Sistem Kelistrikan Penyulang Tegalsari.....	26
3.3 Algoritma Penentuan Lokasi Gangguan.....	30
<b>BAB 4 HASIL DAN ANALISIS .....</b>	<b>33</b>
4.1 Hasil Analisis Aliran Daya.....	33
4.2 Hasil Analisis Hubung Singkat.....	37
4.2.1 Hasil Analisis Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	37
4.2.2 Hasil Analisis Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah.....	42
4.2.3 Hasil Analisis Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah ....	46
4.2.4 Hasil Analisis Hubung Singkat Antar Fasa.....	49
4.3 Pembentukan <i>Database</i> Tegangan GI.....	53
4.4 Penentuan Jarak Lokasi Gangguan.....	67

4.4.1	Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Kasus 1 .....	67
4.4.2	Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Kasus 2 .....	70
4.4.3	Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Kasus 3 .....	71
4.4.4	Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Kasus 4 .....	73
4.5	Tampilan Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat di <i>Geographical Information System (GIS)</i> .....	74
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....		77
5.1	Kesimpulan.....	77
5.2	Saran.....	77
DAFTAR PUSTAKA .....		79
LAMPIRAN .....		81
BIOGRAFI PENULIS .....		97

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem Distribusi Radial .....	8
Gambar 2.2	Sistem Distribusi <i>Loop</i> .....	8
Gambar 2.3	Sistem Distribusi Jaring-Jaring .....	9
Gambar 2.4	Sistem Distribusi <i>Spindle</i> .....	9
Gambar 2.5	Sistem Distribusi Radial Sederhana .....	11
Gambar 2.6	Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Fasa A .....	14
Gambar 2.7	Hubungan Urutan untuk Fasa A ke Tanah .....	15
Gambar 2.8	Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah .....	16
Gambar 2.9	Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah .....	18
Gambar 2.10	Hubung Singkat Antar Fasa B dan Fasa C .....	18
Gambar 2.11	<i>Single Line Diagram</i> Permodelan Gangguan .....	20
Gambar 2.12	Grafik Arus-Tegangan saat Terjadi Gangguan .....	21
Gambar 3.1	Tampilan Awal Sistem Informasi Geografis PT. PLN Area Distribusi Jawa Timur .....	25
Gambar 3.2	Tampilan Penyulang Tegalsari pada Sistem Informasi Geografis .....	26
Gambar 3.3	<i>Single Line Diagram</i> Jaringan Penyulang Tegalsari .....	29
Gambar 3.4	Diagram Alir Metode Penentuan Lokasi Gangguan .....	30
Gambar 4.1	Konsep Pendekatan Urutan Kedip Tegangan .....	68
Gambar 4.2	Tampilan Awal Penentuan Jarak Lokasi Gangguan pada <i>Geographical Information System</i> (GIS) .....	75
Gambar 4.3	Pemasukkan Data Tegangan dan Arus Gardu Induk pada <i>GIS</i> .....	75
Gambar 4.4	Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan pada <i>GIS</i> .....	76

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Variasi Besaran Tegangan dan Durasi Berdasarkan Standar IEEE 1159.....	19
Tabel 3.1	Daftar Nomor Tiang pada Penyulang Tegalsari .....	26
Tabel 3.2	Data Panjang Saluran Udara Penyulang Tegalsari .....	27
Tabel 3.3	Data Pembebanan Tiap Fasa pada Penyulang Tegalsari....	28
Tabel 4.1	Data Magnitudo dan Sudut Arus Hasil Analisis Aliran Daya Metode <i>Backward Forward</i> .....	33
Tabel 4.2	Data Magnitudo dan Sudut Tegangan Hasil Analisis Aliran Daya Metode <i>Backward Forward</i> .....	34
Tabel 4.3	Data Error Magnitudo Tegangan dan Arus .....	36
Tabel 4.4	Data Simulasi Hubung Singkat pada ETAP 12.6 .....	37
Tabel 4.5	Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Setiap Bus .....	39
Tabel 4.6	Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Setiap Bus .....	43
Tabel 4.7	Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Setiap Bus .....	46
Tabel 4.8	Hasil Tegangan dan Arus Fasa Saat Terjadi Hubung Singkat Antar Fasa pada Setiap Bus .....	50
Tabel 4.9	<i>Database</i> Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk Saat Terjadi Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Setiap Bus .....	54
Tabel 4.10	<i>Database</i> Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk Saat Terjadi Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Setiap Bus .....	58
Tabel 4.11	<i>Database</i> Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk saat Terjadi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Setiap Bus .....	61

Tabel 4.12	<i>Database</i> Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk Saat Terjadi Hubung Singkat Antar Fasa pada Setiap Bus .....	64
Tabel 4.13	Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah (Kasus 1) .....	69
Tabel 4. 14	Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah (Kasus 2) .....	71
Tabel 4. 15	Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah (Kasus 3) .....	73
Tabel 4. 16	Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa (Kasus 4) .....	74

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Keandalan dan kualitas suplai daya merupakan dua hal penting dalam sistem distribusi tenaga listrik. Kedua hal ini berkaitan erat dengan angka dan durasi kejadian gangguan [1]. Meskipun gangguan tidak dapat dihindarkan, akan tetapi dampak dari gangguan dapat diminimalisir dengan mendeteksi lokasi gangguan dengan cepat. Dengan mendeteksi lokasi gangguan dengan cepat akan mengurangi kerugian waktu pelanggan akibat pemadaman, sehingga kerugian ekonomis pelanggan juga dapat diminimalisir.

Pada masa lampau, pendeteksian lokasi gangguan dilakukan secara manual, yaitu dengan menggunakan tenaga manusia, dan prosedur pemutusan jaringan. Semua metode ini membutuhkan waktu yang lama. Metode dengan menggunakan tenaga manusia memerlukan operator untuk memeriksa secara langsung sepanjang penyulang yang terindikasi gangguan. Metode dengan prosedur pemutusan jaringan dapat mendeteksi lokasi gangguan setelah pemutus daya berhenti terbuka setelah beberapa kali dilakukan pemutusan jaringan. Hal ini tentu tidak efektif, selain memerlukan waktu yang lama untuk mendeteksi lokasi gangguan, tingkat keamanan metode prosedur pemutusan jaringan termasuk rendah karena gangguan yang sering terjadi adalah gangguan hubung singkat [2].

Dibutuhkan metode pendeteksian lokasi gangguan secara cepat, sehingga berkembanglah berbagai metode pendeteksi lokasi gangguan otomatis dimana dapat dibagi menjadi tiga kategori utama, yaitu metode perpindahan gelombang [3], metode kecerdasan buatan [4], dan metode impedansi [5]. Metode perpindahan gelombang dapat mendeteksi lokasi gangguan dengan mengukur waktu perpindahan gelombang tegangan atau arus dari sumber gangguan menuju titik pengukuran, metode ini biasanya diaplikasikan pada sistem transmisi karena akan membutuhkan biaya banyak jika diimplementasikan pada jaringan distribusi. Metode kecerdasan buatan memerlukan data pengukuran real time, status rele dan pemutus daya, keefektifan metode ini sangat tergantung pada jumlah dan kualitas data yang diperoleh. Pada jaringan distribusi, metode impedansi lebih banyak digunakan karena terdapat perhitungan menggunakan



persamaan matematis dari tegangan yang terukur saat terjadi gangguan untuk mendeteksi lokasi gangguan.

Metode pendeteksian lokasi gangguan semakin berkembang dengan mengaplikasikan data kualitas daya [6] - [7]. Prinsip dasar dari metode ini adalah mempertimbangkan timbulnya besar kedip tegangan yang berbeda ketika terjadi gangguan di titik yang berbeda pula. Pada metode [6] yang diaplikasikan pada jaringan distribusi, gelombang kedip tegangan dari pengukuran akan dibandingkan dengan hasil gelombang yang telah disimulasikan sebelumnya, kemudian dicari yang paling mendekati dengan hasil simulasi menggunakan kecerdasan buatan Genetic Algorithm. Pada metode [7] membutuhkan pengukuran kedip tegangan di banyak titik, kemudian dibandingkan dengan kedip tegangan hasil simulasi yang telah dilakukan untuk menentukan lokasi gangguan.

Pada metode yang diusulkan pada tugas akhir ini akan menggunakan pola profil kedip tegangan untuk menentukan lokasi gangguan pada jaringan distribusi [1]. Dengan menggunakan pola kedip tegangan ini, semua topologi atau konfigurasi jaringan distribusi akan mungkin untuk dipertimbangkan. Tampilan antarmuka konfigurasi jaringan distribusi kerap dihubungkan dengan lokasi geografis suatu jaringan tersebut. Oleh karena itu, diharapkan tugas akhir ini menghasilkan tampilan antarmuka dari penentuan lokasi gangguan pada suatu jaringan distribusi.

## **1.2 Permasalahan**

Muncul beberapa permasalahan berdasar pada uraian latar belakang diatas yang akan dibahas dalam tugas akhir ini, yaitu memodelkan saluran distribusi yang tersedia pada *Geographical Information System* (GIS). Data yang didapat dari GIS digunakan untuk mencari nilai kedip tegangan berdasarkan hasil analisis hubung singkat. Nilai kedip tegangan akibat hubung singkat yang terjadi di suatu titik lokasi akan berbeda dengan nilai kedip tegangan akibat hubung singkat di titik lain. Sehingga, diperlukan nilai kedip tegangan akibat hubung singkat di semua titik, dan semua jenis hubung singkat. Hal ini dilakukan untuk memperoleh pola kedip tegangan dimana akan dijadikan sebagai dasar pendekatan urutan kedip tegangan. Setelah mendapatkan lokasi gangguan, diperlukan rancangan interface pada GIS yang bertujuan untuk menampilkan hasil penelitian secara informatif.

### 1.3 Tujuan

Penyusunan tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Mendapatkan pola kedip tegangan yang terjadi akibat semua jenis hubung singkat pada semua titik sistem distribusi radial.
2. Mengadaptasi metode pendekatan urutan (*ranking approach*) kedip tegangan untuk menemukan lokasi gangguan.
3. Mengembangkan sistem informasi terkait penentuan lokasi gangguan akibat hubung singkat pada sistem distribusi dalam bentuk GIS.

### 1.4 Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan pada permasalahan penelitian tugas akhir ini, antara lain:

1. Pemodelan saluran distribusi radial penyulang Tegalsari berdasarkan data dari *Geographical Information System Smallworld* PLN Area Distribusi Jawa Timur.
2. Perangkat lunak yang digunakan adalah *Emacs 22.1* dan *ETAP 12.6*.
3. Sistem distribusi yang diterapkan adalah sistem distribusi seimbang.
4. Beban pada penyulang dianggap beban statis.
5. Gangguan yang dianalisis berupa gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, tiga fasa ke tanah, dan antar fasa.

### 1.5 Metodologi

Alur metodologi penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Studi literatur yang dilakukan berdasarkan pada paper, jurnal atau buku yang berfokus pada analisis aliran daya metode *backward forward*, analisis hubung singkat, pola kedip tegangan, penentuan lokasi gangguan dengan pendekatan urutan kedip tegangan, dan *Geographical Information System* (GIS). Pengumpulan data dilakukan melalui GIS yang telah dikembangkan oleh PLN. Data yang dikumpulkan berupa panjang saluran, impedansi kabel (urutan positif, negatif, dan nol), data beban trafo, dan jenis kabel.

## 2. Pemodelan Sistem

Sistem distribusi yang akan diteliti dimodelkan dalam bentuk matematis berdasar data-data yang telah diperoleh. Sistem yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu penyulang Tegalsari, Kota Surabaya, dengan mengabaikan hambatan hubung singkat ( $Z_f$ ), dan menganggap beban berupa transformator distribusi.

## 3. Simulasi

Terdapat tiga simulasi yang dilakukan pada tugas akhir ini, yaitu simulasi aliran daya untuk mengetahui nilai tegangan dan sudut fasa saat keadaan normal, atau sebelum terjadi gangguan. Metode yang digunakan pada program ini yaitu metode topologi jaringan dikarenakan sesuai dengan topologi jaringan penyulang tegalsari. Simulasi kedua yaitu simulasi gangguan hubung singkat yang bertujuan untuk mencari nilai arus gangguan, dan nilai kedip tegangan yang terjadi pada setiap bus dan setiap jenis gangguan. Simulasi ketiga yaitu penentuan lokasi gangguan menggunakan metode pendekatan urutan kedip tegangan berdasarkan hasil yang didapat dari simulasi gangguan hubung singkat.

## 4. Pengujian (Validasi)

Hasil yang didapatkan dari simulasi, yaitu estimasi lokasi gangguan, akan diuji ketepatannya (validasi) dan dianalisis dengan software ETAP 12.6. Jika hasil yang didapatkan sudah sesuai dengan simulasi pada ETAP, maka akan lanjut ke tahap selanjutnya. Apabila hasil yang didapat masih belum sesuai dengan simulasi pada ETAP, maka perlu dikaji ulang program yang telah dirancang sebelumnya.

## 5. Pembuatan Laporan Akhir

Pembuatan laporan ditulis berdasarkan hasil akhir penelitian dan kesimpulan yang didapat dari tahap-tahap penelitian yang telah dilakukan.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

BAB 1 : Pendahuluan

Bab ini menjelaskan latar belakang, permasalahan yang muncul, tujuan, alur metodologi, batasan masalah, dan sistematika penulisan penelitian ini.

- BAB 2 : Tinjauan Pustaka  
Bab ini membahas tentang dasar teori sistem tenaga listrik, khususnya jaringan distribusi, gangguan hubung singkat, penentuan lokasi gangguan, dan Sistem Informasi Geografis.
- BAB 3 : Pemodelan Sistem  
Bab ini memodelkan jaringan distribusi yang didapat dari Sistem Informasi Geografis untuk dapat dianalisis lebih lanjut.
- BAB 4 : Simulasi dan Analisis  
Bab ini menjelaskan tentang hasil simulasi aliran daya. Dijelaskan pula perhitungan arus hubung singkat, kedip tegangan, dan estimasi lokasi gangguan yang akan diuji ketepatannya.
- BAB 5 : Kesimpulan  
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran yang didapat dari hasil akhir penelitian beserta analisisnya.

### **1.7 Relevansi dan Manfaat**

Hasil akhir dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Bagi Perusahaan Listrik  
Diharapkan dapat diaplikasikan sebagai metode pendeteksian lokasi gangguan hubung singkat secara otomatis pada sistem distribusi.
2. Bagi Bidang Ilmu Pengetahuan  
Diharapkan dapat membantu perkembangan penerapan Sistem Informasi Geografis pada sistem tenaga listrik yang saat ini masih jarang digunakan.

*--- Halaman ini sengaja dikosongkan ---*

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Sistem Distribusi**

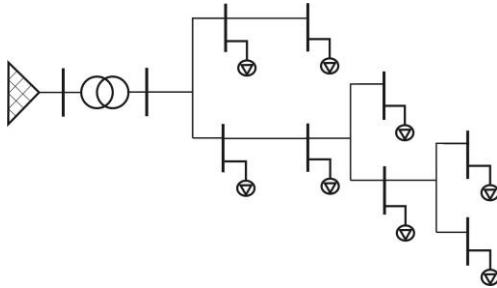
Sistem distribusi merupakan bagian akhir dari sistem penyaluran tenaga listrik. Penyaluran tenaga listrik dimulai dari pembangkitan tenaga listrik, kemudian dikirimkan jarak jauh melalui sistem transmisi, yang akan diteruskan ke pelanggan-pelanggan melalui sistem distribusi. Tegangan yang digunakan pada setiap tahap berbeda, pada pembangkitan biasanya digunakan tegangan menengah antara 11 kV - 24 kV, pada sistem transmisi digunakan tegangan 70 kV, 150 kV, atau 500 kV, kemudian pada sistem distribusi tegangan diturunkan menjadi 20 kV pada sistem distribusi primer, dan diturunkan lagi menjadi 220/380 Volt untuk didistribusikan ke pelanggan pada sistem distribusi sekunder. Penggunaan tegangan berbeda didasarkan pada panjang saluran suatu sistem yang bertujuan untuk meminimalkan rugi-rugi jaringan yang terjadi.

##### **2.1.1 Sistem Distribusi Radial**

Bentuk jaringan pada sistem distribusi atau dapat disebut sebagai topologi jaringan ada beberapa macam. Variasi bentuk topologi jaringan ini didasarkan pada biaya dan keandalan [8]. Selain itu, dipertimbangkan pula kebutuhan dan prioritas beban pada suatu sistem distribusi, dimana beban residensial akan berbeda bentuk topologi dengan beban industri.

Sistem radial merupakan sistem distribusi yang salurannya ditarik secara radial dari suatu titik sumber dan bercabang-cabang. Jenis sistem distribusi ini biasanya digunakan jika antara titik sumber dengan titik beban hanya memiliki satu saluran dan tidak ada saluran alternatif lainnya. Sistem radial merupakan sistem yang paling sederhana dan banyak diterapkan pada sistem distribusi karena modelnya yang bercabang-cabang sesuai dengan kebutuhan pelanggan yang tersebar.

Sistem distribusi radial termasuk sistem yang sederhana dan lebih ekonomis jika dibandingkan dengan topologi lainnya. Akan tetapi, mutu tegangan pada ujung saluran dari topologi jaringan ini tidak baik dikarenakan titik pada ujung saluran ini terdapat drop tegangan yang paling parah. Selain itu, tingkat keandalan dari sistem distribusi ini rendah karena ketika terjadi pemutusan daya pada suatu titik, maka jaringan dibawahnya akan ikut terputus dari sumber.

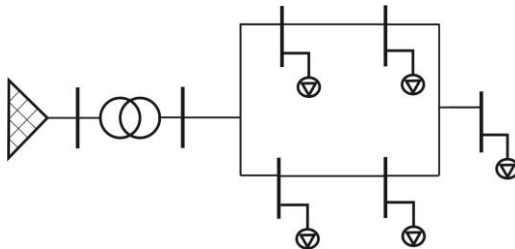


Gambar 2.1 Sistem Distribusi Radial

### 2.1.2 Sistem Distribusi Loop

Sistem distribusi *loop* merupakan salah satu topologi sistem distribusi yang pada umumnya memiliki satu sumber suplai, dan rangkaiannya tertutup, sehingga menyerupai bentuk cincin (*ring*). Oleh karena itu, sistem distribusi *loop* sering disebut juga sistem distribusi *ring*. Karena rangkaiannya tertutup, setiap titik beban memiliki dua jalur suplai, sehingga biasanya topologi ini digunakan untuk melayani beban yang membutuhkan tingkat keandalan tinggi.

Berbeda dengan sistem distribusi radial, sistem distribusi loop ini dapat menghantarkan tenaga listrik dengan kualitas daya yang baik karena jatuh tegangan akibat impedansi saluran lebih kecil. Akan tetapi, sistem distribusi loop ini memiliki biaya investasi yang tinggi karena membutuhkan peralatan pengaman sistem tenaga listrik yang lebih kompleks, serta perhitungan koordinasi pengaman juga lebih rumit, karena tersuplai dua arah.

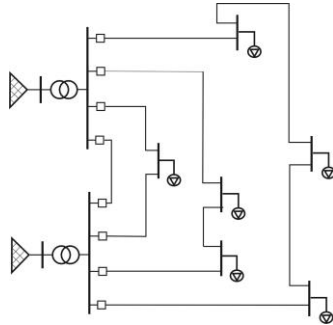


Gambar 2.2 Sistem Distribusi Loop

### 2.1.3 Sistem Distribusi Jaring-Jaring

Sistem distribusi jaring-jaring (*net*) merupakan topologi jaringan gabungan dari topologi radial dan *loop*, yaitu sistem distribusi bercabang-cabang secara radial dalam skala kecil yang dihubungkan beberapa

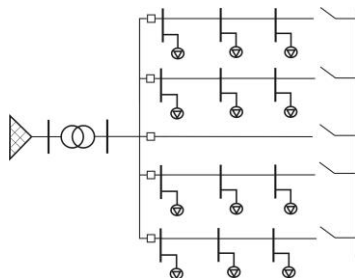
cabang dengan cabang lainnya. Hal ini tentu akan meningkatkan keandalan dari sistem kelistrikan tersebut, dan juga menurunkan jatuh tegangan yang terjadi. Topologi jaringan ini menunjang fleksibilitas pertumbuhan beban, akan tetapi membutuhkan biaya investasi yang besar dan perencanaan sistem kelistrikan yang lebih rumit.



Gambar 2.3 Sistem Distribusi Jaring-Jaring

#### 2.1.4 Sistem Distribusi *Spindle*

Salah satu cara meningkatkan keandalan suatu sistem distribusi tenaga listrik dilakukan dengan mengubah bentuk atau topologi jaringan yang diterapkan. Salah satu hasil pengubahan bentuk tersebut adalah topologi jaringan *spindle*. Pada sistem distribusi *spindle* terdapat beberapa penyulang aktif dan sebuah penyulang cadangan yang disiapkan untuk menanggung beban ketika penyulang aktif harus dilepas dari sistem. Penyulang-penyulang ini dihubungkan melalui gardu hubung yang berperan untuk menghubungkan penyulang mana yang harus disambungkan dalam sistem.



Gambar 2.4 Sistem Distribusi *Spindle*



## 2.2 Beban

Pada umumnya, beban dibagi beberapa jenis berdasarkan konsumennya, yaitu beban industri, beban komersil, dan beban residensial atau perumahan. Beban industri mengkonsumsi daya listrik yang paling besar dikarenakan terdapat motor-motor dengan kapasitas besar, sedangkan beban residensial mengkonsumsi beban relatif kecil karena hanya terdapat beberapa beban-beban statis. Pada dasarnya, beban pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua jenis yaitu beban statis dan beban berputar.

Beban statis yaitu beban yang mengkonsumsi daya listrik yang besarnya konstan atau tidak berubah terhadap waktu. Contoh dari beban statis yaitu lampu pijar, setrika listrik, kulkas, dan lain-lain. Karakteristik dari beban statis yaitu tidak menyumbang arus kontribusi saat terjadi gangguan hubung singkat. Arus kontribusi adalah arus dari beban yang masuk ke dalam sistem kelistrikan saat terjadi gangguan hubung singkat.

Beban berputar atau beban dinamis merupakan beban yang memberikan arus kontribusi karena terdapat waktu disaat beban tidak dapat berhenti berputar seketika, sehingga seolah-olah beban berputar tersebut berperan sebagai generator untuk beberapa saat sampai berhenti berputar. Jenis beban ini dinamakan beban dinamis karena mengkonsumsi daya listrik yang berubah-ubah terhadap waktu. Contoh dari jenis beban dinamis ini adalah motor listrik, dimana saat *starting* daya yang diserap lebih besar dibanding saat operasi normal.

## 2.3 Analisis Aliran Daya 3 Fasa Seimbang Menggunakan Metode *backward forward* [8]

Analisis aliran daya atau *power flow analysis* merupakan salah satu analisis sistem tenaga yang paling dasar yaitu perhitungan magnitude dan sudut fasa dari tegangan setiap bus serta aliran daya aktif dan reaktif pada setiap saluran di sistem tenaga listrik. Sistem distribusi dengan topologi radial memiliki karakter yang berbeda dengan sistem transmisi, sehingga metode analisis aliran daya yang dilakukan pada sistem distribusi radial berbeda pula. Metode *backward forward* merupakan salah satu contoh metode yang dapat diterapkan pada sistem distribusi radial.

Metode *backward forward* merupakan metode yang cocok untuk diterapkan pada sistem distribusi karena menggunakan karakteristik berdasarkan referensi cabang frame. Selain itu, matriks impedansi  $Z_{br}$  dan injeksi arus yang digunakan pada metode ini dijadikan sebagai dasar untuk perhitungannya [9]. Metode ini memiliki keunggulan karena

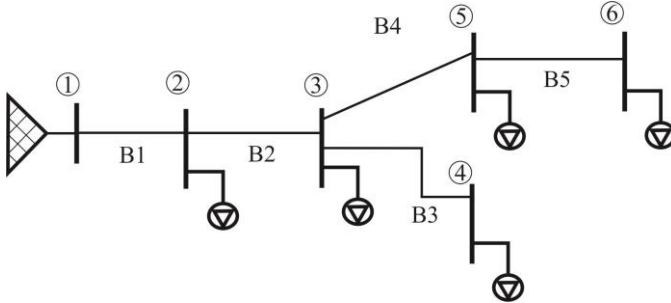
memiliki efisiensi komputasi dan akurasi dari solusinya yang lebih tinggi dibanding metode lain.

Sebagai langkah awal untuk melakukan analisis jaringan tenaga listrik, digunakan pemodelan matematis. Teori Graph pertama kali dikenalkan oleh Leonhard Euler pada tahun 1736. Teori Graph mudah digunakan untuk menunjukkan hubungan antara objek. Teori ini mengacu pada node dan elemen yang menghubungkan antara node yang juga akan digunakan pada metode *backward forward*.

Berdasarkan dari frame cabang sebagai referensi, metode *backward forward* menggunakan matriks impedansi cabang dan teknik injeksi arus. Dengan mengaplikasikan teori graph, pembuatan matriks K bisa didapatkan dengan mudah, kemudian algoritma topologi *network* digunakan untuk mencari aliran daya. Metode ini diawali dengan mencari besar arus pada setiap saluran menggunakan persamaan daya:

$$I_i = \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right)^* \quad (2.1)$$

Dimana  $I_i$ ,  $P_i$ ,  $Q_i$ , dan  $V_i$  adalah arus, daya aktif, daya reaktif, dan tegangan pada bus  $i$ .



Gambar 2.5 Sistem Distribusi Radial Sederhana

Terdapat sebuah sistem distribusi yang sederhana seperti pada gambar 2.5 menyuplai beban dengan jalur arus tertentu. Dengan menggunakan persamaan (2.1) akan didapatkan arus pada setiap bus, dan arus pada setiap saluran dapat dicari dengan hukum Kirchoff:

$$\begin{aligned} B_5 &= I_6 \\ B_4 &= I_5 + I_6 \\ B_3 &= I_4 \\ B_2 &= I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

Persamaan diatas disebut sebagai persamaan injeksi arus yang dapat diubah ke dalam matriks injeksi arus atau BIBC (*Bus Injection to Branch Current*):

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Persamaan matriks diatas dapat disederhanakan menjadi

$$[B] = [BIBC][I] \quad (2.4)$$

Pada setiap saluran terdapat impedansi yang akan menghasilkan drop tegangan. Besar drop tegangan dapat dicari menggunakan persamaan yang berasal dari hukum Kirchoff

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 - Z_{12}B_1 \\ V_3 &= V_2 - Z_{23}B_2 \\ V_4 &= V_3 - Z_{34}B_3 \\ V_5 &= V_3 - Z_{35}B_4 \\ V_6 &= V_5 - Z_{56}B_5 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dengan mensubstitusikan hasil persamaan (2.5) yang pertama ke dalam persamaan (2.5) yang kedua, kemudian hasil persamaan tersebut disubstitusikan ke dalam persamaan (2.5) yang ketiga dan seterusnya, akan diperoleh persamaan:

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 - Z_{12}B_1 \\ V_3 &= V_1 - Z_{12}B_1 - Z_{23}B_2 \\ V_4 &= V_1 - Z_{12}B_1 - Z_{23}B_2 - Z_{34}B_3 \\ V_5 &= V_1 - Z_{12}B_1 - Z_{23}B_2 - Z_{35}B_4 \\ V_6 &= V_1 - Z_{12}B_1 - Z_{23}B_2 - Z_{35}B_4 - Z_{56}B_5 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dengan memindahkan ruas, maka akan didapatkan persamaan drop tegangan

$$\begin{aligned} V_1 - V_2 &= Z_{12}B_1 \\ V_1 - V_3 &= Z_{12}B_1 + Z_{23}B_2 \\ V_1 - V_4 &= Z_{12}B_1 + Z_{23}B_2 + Z_{34}B_3 \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$V_1 - V_5 = Z_{12}B_1 + Z_{23}B_2 + Z_{35}B_4$$

$$V_1 - V_6 = Z_{12}B_1 + Z_{23}B_2 + Z_{35}B_4 + Z_{56}B_5$$

Persamaan diatas dapat dibentuk menjadi matriks *BCBV* (*Branch Current to Branch Voltage*), yaitu

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & Z_{35} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & Z_{35} & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Dari matriks diatas dapat diperoleh drop tegangan pada setiap bus dengan menyederhanakan matriks tersebut menjadi

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (2.9)$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.3) dengan persamaan (2.2), maka akan didapatkan persamaan berikut

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (2.10)$$

Tegangan akhir dapat dicari dengan melakukan perhitungan persamaan (2.1) secara berulang, akan tetapi nilai  $V_i$  diubah menjadi

$$V_{i(bar)} = V_{i(lama)} - \Delta V \quad (2.11)$$

## 2.4 Analisis Gangguan Hubung Singkat pada Sistem Distribusi 3 Fasa Seimbang Topologi Radial

Gangguan merupakan salah satu fenomena yang menyebabkan keadaan menjadi tidak normal dan dapat mengganggu kontinuitas suplai daya. Dari berbagai jenis gangguan, hubung singkat merupakan gangguan yang paling sering terjadi, khususnya pada sistem distribusi. Secara umum tipe gangguan hubung singkat dapat dibagi menjadi dua yaitu gangguan hubung singkat simetri dan asimetri.

Gangguan hubung singkat simetri terdiri dari [2]:

1. Gangguan hubung singkat 3 fasa ketanah

Sedangkan gangguan hubung singkat asimetri terdiri atas:

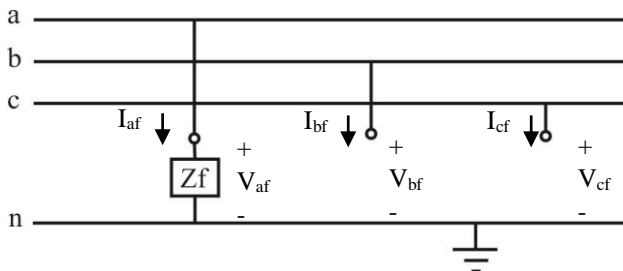
1. Gangguan hubung singkat antar fasa
2. Gangguan hubung singkat 2 fasa ketanah
3. Gangguan hubung singkat 1 fasa ketanah

Pada gangguan asimetri magnitude dari tegangan serta arus yang mengalir pada setiap fasa berbeda. Gangguan asimetri akan mengakibatkan tegangan pada fasa yang tidak terganggu akan naik serta akan mengakibatkan kenaikan arus pada fasa yang terganggu. Sebagian

besar gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan asimetri. Untuk menganalisis gangguan asimetri digunakan metode komponen simetri untuk menentukan tegangan dan arus pada sistem kelistrikan setelah terjadi gangguan. Analisis hubung singkat dilakukan untuk mencari arus hubung singkat yang terjadi. Selain itu analisis hubung singkat juga digunakan dalam mempertimbangkan kualitas suplai daya, seperti kedip tegangan, harmonisa, dan ketidak seimbangan.

#### 2.4.1 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah [2]

Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah diakibatkan oleh adanya salah satu penghantar fasa yang bersentuhan dengan tanah. Gangguan ini menyebabkan sistem menjadi tidak seimbang, oleh karena itu jenis hubung singkat ini termasuk gangguan asimetri. Hubung singkat satu fasa ke tanah merupakan jenis hubung singkat yang paling sering terjadi dibandingkan dengan jenis hubung singkat lain.



Gambar 2.6 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Fasa A

Dari gambar 2.6 dapat dilihat bahwa besar arus gangguan pada fasa yang tidak terganggu, pada kasus diatas  $I_{bf}$  dan  $I_{cf}$  sama dengan nol. Sedangkan pada fasa  $a$  terdapat arus yang menuju ke tanah melalui impedansi gangguan  $Z_f$ . Jika fasa netral pada generator atau grid pada sistem diketanahkan secara *solid*, maka nilai  $Z_f$  sama dengan nol [2]. Untuk tegangan pada fasa terganggu digunakan persamaan

$$V_f = V_{af} = Z_f I_{af} \quad (2.12)$$

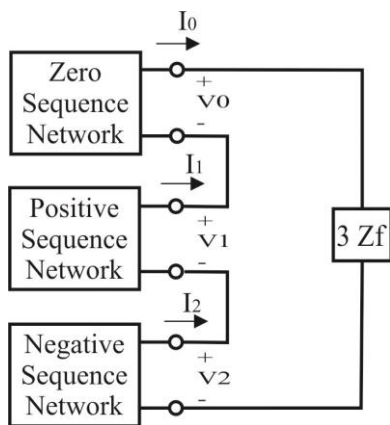
Hubung singkat satu fasa ke tanah akan memunculkan arus urutan nol dan negatif, selain arus urutan positif. Oleh karena itu, untuk mencari besar arus hubung singkat satu fasa ke tanah, kita harus meninjau arus urutan nol, positif, dan negatif. Besar arus urutan positif, negatif, dan nol bernilai sama besar dengan menggunakan persamaan

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{E_a}{(Z_{th0} + Z_{th1} + Z_{th2} + 3Z_f)} \quad (2.13)$$

Besar tegangan urutan nol, positif, dan negatif juga dapat diperoleh menggunakan persamaan

$$\begin{aligned} V_1 &= E_1 - I_1 Z_{th1} \\ V_2 &= -I_2 Z_{th2} \\ V_0 &= -I_0 Z_{th0} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Dari persamaan (2.14) dapat digambarkan dengan menghubungkan semua rangkaian urutan secara seri. Pada hubung singkat satu fasa ke tanah, impedansi pengganti didapatkan menggunakan rangkaian thevenin hingga ke titik gangguan untuk setiap urutan, kemudian impedansi thevenin ketiga urutan ini dihubungkan seri, seperti pada gambar 2.7. Pada banyak penerapannya, nilai impedansi urutan positif dan negatif sama besar.



Gambar 2.7 Hubungan Urutan untuk Fasa A ke Tanah

Mencari nilai arus dan tegangan pada setiap fasa dapat menggunakan matriks transformasi komponen simetris atau biasa disebut *symmetrical components transformation matrix* (SCTM)

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

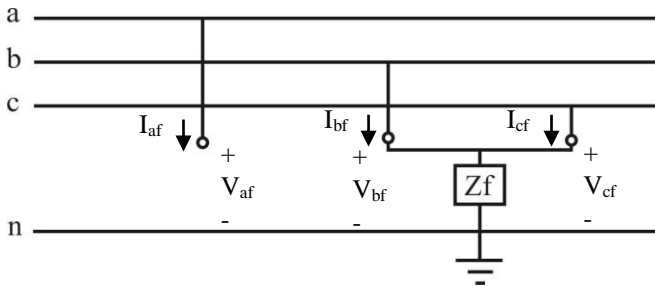
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Dimana  $I_a, I_b, I_c$  adalah arus pada fasa a, b, dan c secara urut, sedangkan  $I_a^0, I_a^1, I_a^2$  adalah arus urutan nol, positif, dan negatif pada fasa a secara urut. Notasi seperti ini berlaku juga pada persamaan tegangan diatas. Nilai  $a$  pada persamaan diatas adalah

$$\begin{aligned} a &= 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j0,866 \\ a^2 &= 1 \angle 240^\circ = -0,5 - j0,866 \end{aligned} \quad (2.17)$$

#### 2.4.2 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah [2]

Gangguan hubung singkat fasa ke fasa ke tanah disebabkan oleh dua penghantar fasa yang saling terhubung, kemudian terhubung dengan tanah. Nama lain dari jenis hubung singkat ini adalah hubung singkat dua fasa ke tanah. Jenis hubung singkat ini termasuk gangguan tak seimbang (asimetri).



Gambar 2.8 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Dari gambar 2.8 dapat dilihat bahwa besar arus gangguan pada fasa yang tidak terganggu, pada kasus diatas  $I_{af}$  sama dengan nol. Untuk mencari tegangan pada fasa terganggu dapat menggunakan persamaan

$$V_{bf} = V_{cf} = (I_{bf} + I_{cf}) Z_f \quad (2.18)$$

$$I_{af} = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 = 0 \quad (2.19)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.16) ke dalam persamaan (2.18) dapat diturunkan menjadi persamaan

$$\begin{aligned} V_b &= V_c \\ V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^2 &= V_a^0 + a V_a^1 + a^2 V_a^2 \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$V_a^1 = V_a^2$$

Substitusi arus  $I_{bf}$  dan  $I_{cf}$  pada persamaan (2.18) dengan persamaan (2.16), maka akan didapatkan persamaan

$$\begin{aligned} V_{bf} &= Z_f(I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 + I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2) \\ V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^2 &= Z_f(2I_a^0 - I_a^1 - I_a^2) \\ V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^2 &= 3Z_f I_a^0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Mensubstitusikan persamaan (2.20) ke dalam persamaan (2.21) akan membentuk persamaan

$$\begin{aligned} V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^1 &= 3Z_f I_a^0 \\ V_a^0 + V_a^1(a^2 + a) &= 3Z_f I_a^0 \\ V_a^0 - V_a^1 &= 3Z_f I_a^0 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Dari persamaan (2.14) dapat disubstitusikan ke dalam persamaan (2.22) dan menghasilkan persamaan

$$I_a^0 = -\frac{E_a - Z^1 I_a^1}{Z^0 + 3Z_f} \quad (2.23)$$

Persamaan yang sama pula disubstitusikan ke dalam persamaan (2.20) akan diperoleh persamaan

$$I_a^2 = -\frac{E_a - Z^1 I_a^1}{Z^2} \quad (2.24)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.23) dan persamaan (2.24) ke dalam persamaan (2.19), maka akan diperoleh persamaan

$$I_a^1 = \frac{E_a}{Z^1 + \frac{Z^2(Z^0 + 3Z_f)}{Z^2 + Z^0 + 3Z_f}} \quad (2.25)$$

Ketika nilai arus seluruh urutan sudah diperoleh, maka dapat dicari nilai tegangan setiap urutan dengan persamaan yang digunakan pula pada hubung singkat satu fasa ke tanah. Dengan matriks SCTM, nilai dari arus dan tegangan pada setiap fasa juga dapat diperoleh, sehingga arus hubung singkat dapat diperoleh dengan menggunakan rumus

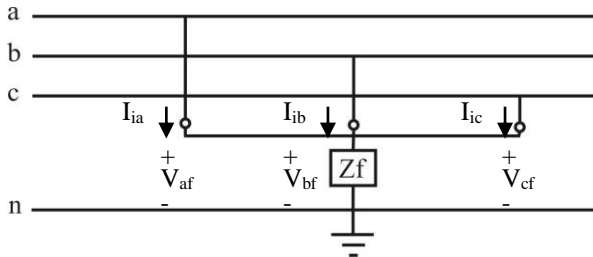
$$I_f = I_b + I_c \quad (2.26)$$

### 2.4.3 Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah [2]

Gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah disebabkan adanya ketiga penghantar fasa terhubung secara langsung ke tanah. Gangguan ini merupakan jenis gangguan simetri (seimbang). Jenis gangguan ini termasuk jenis gangguan hubung singkat yang paling jarang terjadi karena



memang kemungkinan terjadi sangat kecil jika dibandingkan dengan jenis gangguan hubung singkat yang lainnya.



Gambar 2.9 Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

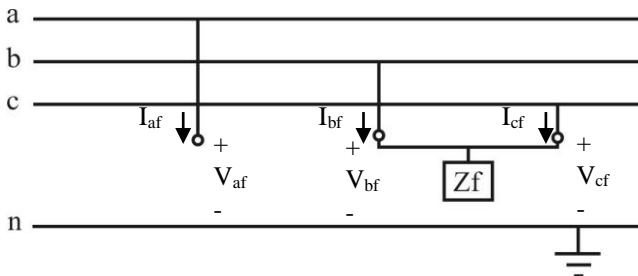
Seperti terlihat pada di gambar 2.9 bahwa besar arus gangguan di setiap fasa akan sama besar, dan begitu pula tegangan pada setiap fasanya.

$$I_{ia} = I_{ib} = I_{ic} = \frac{V_i}{Z_{ii} + Z_f} \quad (2.27)$$

Dimana notasi  $i$  untuk menandakan bus, sedangkan  $a$ ,  $b$ , dan  $c$  menandakan fasa penghantarnya.

#### 2.4.4 Hubung Singkat Antar Fasa

Gangguan hubung singkat antar fasa disebabkan adanya penghantar fasa terhubung secara langsung dengan salah satu penghantar fasa lainnya. Gangguan ini merupakan gangguan tak seimbang (asimetri) dan menyebabkan sistem menjadi tidak seimbang.



Gambar 2.10 Hubung Singkat Antar Fasa B dan Fasa C

Dikarenakan tidak ada hubungan antara penghantar ke tanah, maka jenis hubung singkat ini tidak akan memunculkan arus urutan nol, hanya saja menimbulkan arus urutan negatif dan juga positif. Dari gambar 2.10 dapat dilihat bahwa arus  $I_{af}$  sama dengan nol, sedangkan

$$I_{bf} = -I_{cf} \quad (2.28)$$

Persamaan (2.28) kemudian diubah ke dalam persamaan arus urutan menggunakan matriks SCTM, sehingga didapatkan persamaan

$$I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 = I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2 \quad (2.29)$$

Karena hubung singkat antar fasa ini tidak memunculkan arus urutan nol, maka  $I_a^0 = 0$ . Sehingga persamaan diatas menjadi

$$(a^2 - a)I_a^1 = (a - a^2)I_a^2$$

$$I_a^1 = -I_a^2 \quad (2.30)$$

Untuk mencari arus urutan positif dapat menggunakan rumus [2]

$$I_a^1 = \frac{E_a}{Z^1 + Z^2 + Z_f} \quad (2.31)$$

Setelah mendapatkan nilai arus urutan positif, maka arus urutan negatif akan didapatkan menggunakan persamaan (2.30). Setelah nilai arus setiap urutan sudah didapatkan, maka akan dapat dicari nilai arus setiap fasa, dan begitu pula untuk nilai tegangannya.

## 2.5 Kedip Tegangan

Hubung singkat dapat mengakibatkan terjadinya kedip tegangan (voltage sags). Kedip tegangan adalah fenomena turunnya nilai rms tegangan antara 0,1 p.u. hingga 0,9 p.u. selama durasi waktu 0,5 cycles hingga 1 menit. Durasi voltage sag dapat dibagi menjadi 3 kategori yaitu instantaneous, momentary dan temporary seperti yang terlihat pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Variasi Besaran Tegangan dan Durasi Berdasarkan Standar IEEE 1159

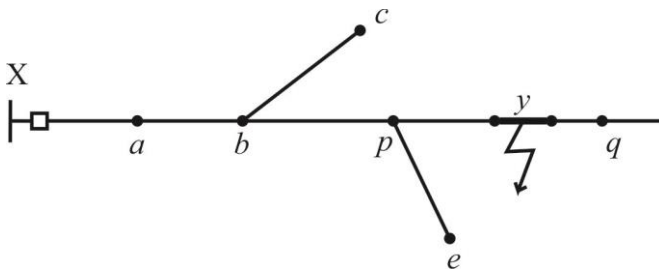
<i>Categories</i>	<i>Typical Duration</i>	<i>Typical Voltage Magnitude</i>
<i>1.0 Short-Duration Variations</i>		
<i>1.1 Instantaneous</i>		
<i>1.1.1 Interruption</i>	<i>0.5-30 cycles</i>	<i>&lt;0.1 pu</i>
<i>1.1.2 Sag (Dip)</i>	<i>0.5-30 cycles</i>	<i>0.1-0.9 pu</i>
<i>1.1.3 Swell</i>	<i>0.5-30 cycles</i>	<i>1.1-1.8 pu</i>
<i>1.2 Momentary</i>		
<i>1.2.1 Interruption</i>	<i>30 cycles- 3s</i>	<i>&lt;0.1 pu</i>

Kedip tegangan yang terjadi akibat hubung singkat pada suatu titik memiliki nilai berbeda jika dibandingkan dengan nilai kedip tegangan yang dihasilkan akibat hubung singkat pada titik lainnya. Begitu pula dengan jenis hubung singkatnya, akan berbeda nilai kedip tegangannya apabila jenis hubung singkat yang terjadi juga berbeda. Melalui pola kedip tegangan ini dapat dilakukan pendeteksian lokasi gangguan [10].

## 2.6 Estimasi Lokasi Gangguan [10]

Gangguan hubung singkat akan mengakibatkan sistem tidak berada dalam kondisi semestinya, yang paling terlihat jelas yaitu adanya kedip tegangan pada sistem. Jika dibiarkan terus menerus, dampaknya dapat merusak peralatan-peralatan yang sensitif terhadap perubahan tegangan. Oleh karena itu gangguan harus segera dapat ditanggulangi untuk menjaga keandalan dan kualitas sistem tenaga listrik, dan langkah pertama yaitu menentukan lokasi gangguan hubung singkat.

Ada beberapa metode penentuan lokasi gangguan yang sudah berkembang, baik dari metode analitis, maupun kecerdasan buatan. Secara analitis terdapat metode impedansi dan pendekatan urutan kedip tegangan, sedangkan metode Jaringan Saraf Tiruan (JST) juga sudah dikembangkan untuk menentukan lokasi gangguan. Metode pendekatan urutan kedip tegangan merupakan salah satu metode yang realistis dan akurat.



Gambar 2.11 *Single Line Diagram* Permodelan Gangguan

Metode ini memerlukan sensor atau titik pengukuran tegangan dan arus pada suatu lokasi. Pada gambar 2.11 terlihat bahwa titik X merupakan lokasi pengukuran tegangan dan arus, sehingga ketika terjadi gangguan pada titik y yaitu titik di antara bus p dan bus q, akan menyebabkan terjadinya perubahan tegangan dan arus yang terukur pada titik X. Perubahan nilai pada titik pengukuran ini yang akan digunakan untuk

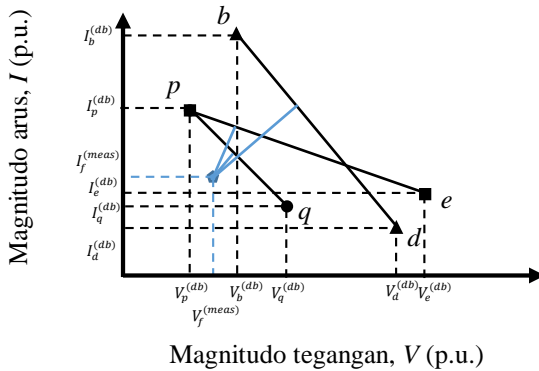
menentukan lokasi gangguan berupa jarak dari suatu bus yang terindikasi sebagai lokasi gangguan.

### 2.6.1 Penentuan Daerah Gangguan

Langkah pertama yaitu menentukan kemungkinan-kemungkinan daerah (*section*) gangguan dengan membandingkan hasil pengukuran tegangan dan arus dengan hasil perhitungan atau simulasi yang telah dilakukan sebelumnya. Simulasi atau perhitungan dilakukan untuk setiap jenis gangguan dan di setiap titik atau bus pada sistem kelistrikan. Suatu daerah misalnya  $p - q$  akan terpilih sebagai daerah terindikasi gangguan ketika memenuhi kondisi

$$V_p^{(db)} \leq V_f^{(meas)} \leq V_q^{(db)} \quad (2.32)$$

$$I_q^{(db)} \leq I_f^{(meas)} \leq I_p^{(db)}$$



Gambar 2.12 Grafik Arus-Tegangan saat Terjadi Gangguan

Dimana  $(V_f^{(meas)}; I_f^{(meas)})$  adalah tegangan dan arus yang terukur pada titik pengukuran saat terjadi gangguan. Sedangkan  $(V^{(db)}; I^{(db)})$  merupakan besarnya tegangan dan arus pada bus yang dimaksud ( $p$  dan  $q$ ) dari *database* hasil perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya. Penentuan daerah gangguan menggunakan kondisi diatas akan dapat memunculkan beberapa kemungkinan daerah gangguan.

### 2.6.2 Pendekatan Urutan

Setelah mendapatkan beberapa kemungkinan daerah terindikasi gangguan, kemudian kemungkinan-kemungkinan tersebut diurutkan

bedasarkan jarak yang terdekat dengan titik gangguan. Pada gambar 2.12 dapat dilihat bahwa garis yang berwarna biru merupakan jarak terdekat dari titik tegangan dan arus terukur dengan masing-masing kemungkinan daerah gangguan ( $d_{k(p-q)}$ ). Untuk mencari jarak tersebut dapat digunakan persamaan trigonometri

$$d_{k(p-q)} = \sqrt{\left(V_r^{(calc)} - V_f^{(meas)}\right)^2 - \left(I_r^{(calc)} - I_f^{(meas)}\right)^2} \quad (2.33)$$

Dimana  $V_r^{(calc)}$  adalah perhitungan kedip tegangan dan  $I_r^{(calc)}$  adalah perhitungan magnitudo arus dengan menggunakan persamaan

$$V_r^{(calc)} = A + B - C + D \quad (2.34)$$

dimana,

$$A = \frac{\left(I_q^{(db)} - I_p^{(db)}\right)^2 \times V_p^{(db)}}{\left(I_q^{(db)} - I_p^{(db)}\right)^2 + \left(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}\right)^2} \quad (2.35)$$

$$B = \frac{\left(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}\right)^2 \times V_f^{(meas)}}{\left(I_q^{(db)} - I_p^{(db)}\right)^2 + \left(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}\right)^2} \quad (2.36)$$

$$C = \frac{\left(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}\right) \times \left(I_q^{(db)} - I_p^{(db)}\right) \times I_p^{(db)}}{\left(I_q^{(db)} - I_p^{(db)}\right)^2 + \left(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}\right)^2} \quad (2.37)$$

$$D = \frac{\left(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}\right) \times \left(I_q^{(db)} - I_p^{(db)}\right) \times I_f^{(meas)}}{\left(I_q^{(db)} - I_p^{(db)}\right)^2 + \left(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}\right)^2} \quad (2.38)$$

dan

$$I_r^{(calc)} = E + F - G + H + J \quad (2.39)$$

dimana,

$$E = \frac{\left(I_q^{(db)} - I_p^{(db)}\right)^3 \times V_p^{(db)}}{\left(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}\right) \times \left(I_q^{(db)} - I_p^{(db)}\right)^2 + \left(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}\right)^3} \quad (2.40)$$

$$F = \frac{\left(I_q^{(db)} - I_p^{(db)}\right) \times \left(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}\right)^2 \times V_f^{(meas)}}{\left(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}\right) \times \left(I_q^{(db)} - I_p^{(db)}\right)^2 + \left(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}\right)^3} \quad (2.41)$$

$$G = \frac{(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}) \times (I_q^{(db)} - I_p^{(db)})^2 \times I_p^{(db)}}{(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}) \times (I_q^{(db)} - I_p^{(db)})^2 + (V_q^{(db)} - V_p^{(db)})^3} \quad (2.42)$$

$$H = \frac{(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}) \times (I_q^{(db)} - I_p^{(db)})^2 \times I_f^{(meas)}}{(V_q^{(db)} - V_p^{(db)}) \times (I_q^{(db)} - I_p^{(db)})^2 + (V_q^{(db)} - V_p^{(db)})^3} \quad (2.43)$$

$$J = I_p^{(db)} - \frac{(I_q^{(db)} - I_p^{(db)}) \times V_p^{(db)}}{(V_q^{(db)} - V_p^{(db)})} \quad (2.44)$$

Setelah perhitungan jarak terdekat dari titik gangguan ke masing-masing kemungkinan daerah gangguan selesai, kemudian dilakukan pengurutan dari nilai yang terkecil akan dijadikan sebagai urutan pertama daerah terindikasi gangguan. Ketika ternyata urutan pertama bukan merupakan daerah gangguan sebenarnya, maka urutan kedua akan dipakai sebagai kemungkinan terbesar selanjutnya sebagai daerah gangguan.

### 2.6.3 Perhitungan Jarak Titik Gangguan

Pendekatan urutan kedip tegangan sudah terlaksana, kemudian dilakukan perhitungan jarak aktual atau jarak titik gangguan yang sebenarnya (satuan bisa dalam meter ataupun kilometer). Semisal pada urutan pertama ditempati oleh daerah gangguan antara bus  $p$  dan bus  $q$ . Maka dengan menggunakan aturan trigonometri, jarak aktual dapat diperoleh dengan persamaan

$$F_d = \left| \frac{df}{l_{p-q}} \right| \times \text{Actual length} \quad (2.45)$$

Dimana  $F_d$  adalah nilai jarak aktual terukur dari bus  $p$  (satuan dalam meter atau kilometer), sedangkan  $df$  dicari menggunakan persamaan

$$df = \sqrt{(V_r^{(calc)} - V_p^{(db)})^2 - (I_r^{(calc)} - I_p^{(db)})^2} \quad (2.46)$$

dan,

$$l_{p-q} = \sqrt{(V_q^{(db)} - V_p^{(db)})^2 - (I_q^{(db)} - I_p^{(db)})^2} \quad (2.47)$$

## 2.7 Sistem Informasi Geografis

Sistem Informasi Geografis (Geographical Information System) atau lebih sering disebut GIS merupakan sistem basis data yang bersifat spasial, dimana pengguna dapat memanfaatkan data numerik dan juga

data spasial dalam satu sistem informasi. Sistem Informasi Geografis memuat database tentang tata ruang umum yang menggunakan sistem koordinat sebagai referensinya.

GIS membutuhkan input data (dari maps, satellite, survey dan sumber data lainnya), penyimpanan data jaringan, analisis, permodelan dan report data. Komponen-komponen pendukung GIS terdiri dari lima komponen yang bekerja secara terintegrasi yaitu perangkat keras (hardware), perangkat lunak (software), data, manusia, dan metode.

Penggunaan GIS modern (berbasis komputer, digital) dimulai sejak tahun 1960-an dan mulai diperkenalkan di Indonesia pada tahun 1972 dengan nama Data Banks for Development. Munculnya istilah GIS seperti sekarang ini setelah dicetuskan oleh general Assembly dari International Geographical Union di Ottawa Kanada yang digunakan untuk menyimpan, menganalisis dan mengolah data yang dikumpulkan.

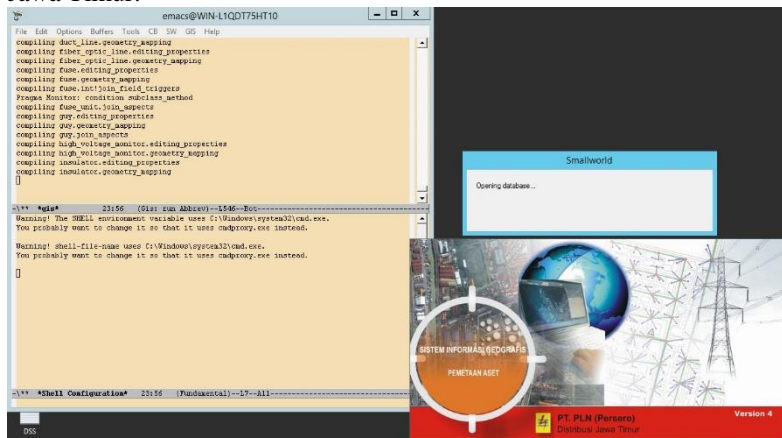
GIS ini merupakan sistem informasi yang cocok digunakan dalam monitoring sistem tenaga listrik [11]. Salah satu pengaplikasian dari GIS pada sistem tenaga listrik ini adalah pada jaringan sistem distribusi. Hal ini dimungkinkan karena kemampuan GIS untuk memproses dan menganalisis data dengan cepat, dan dapat dipresentasikan dalam format geografis. GIS dapat digunakan untuk mengetahui panjang kabel dan kebutuhan komponen penunjang distribusi tenaga listrik dengan melihat jalur terpendek yang dilalui kabel sehingga waktu kerja juga dapat efisien. Selain itu pemanfaatan data spasial tentang panjang kabel juga dapat digunakan untuk analisis kondisi saluran distribusi tenaga listrik dan faktor-faktor yang mempengaruhinya dengan mengetahui besarnya tegangan drop dan rugi daya dari setiap panjang kabel. Pemanfaatan GIS juga dapat memberikan informasi trend pertumbuhan beban dan penggunaan beban pada area geografis yang diamati. GIS merupakan sebuah platform yang masih memiliki banyak potensi yang dapat dikembangkan, salah satunya sebagai tampilan antarmuka pendeteksi lokasi gangguan.

## PEMODELAN SISTEM

### 3.1 Penggunaan Sistem Informasi Geografis

Sistem Informasi Geografis sudah banyak digunakan pada berbagai bidang usaha, antara lain saluran pipa gas pada perusahaan minyak dan gas bumi, dan saluran pipa air pada Perusahaan Daerah Air Minum. Saat ini, Perusahaan Listrik Negara juga sedang mengembangkan Sistem Informasi Geografis untuk sistem distribusi tenaga listrik.

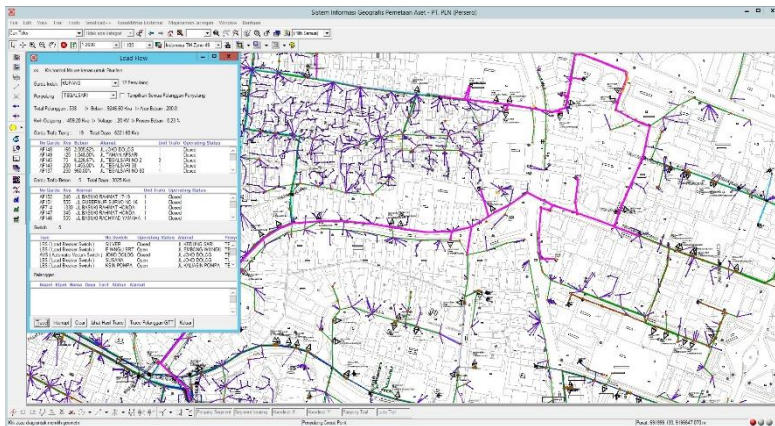
Hasil dari pengembangan sistem informasi geografis tersebut berupa perangkat lunak yang dinamai *GIS Smallworld* PLN Area Distribusi Jawa Timur. Perangkat lunak ini menyediakan informasi geospasial pengelolaan aset utilitas listrik untuk mendukung perencanaan jaringan, desain, pemeliharaan, dan operasi pada PT. PLN Area Distribusi Jawa Timur.



Gambar 3.1 Tampilan Awal Sistem Informasi Geografis PT. PLN Area Distribusi Jawa Timur

Pada perangkat lunak ini, dapat dilihat jaringan distribusi pada Kota Surabaya yang berupa penyulang-penyulang yang ditarik dari masing-masing gardu induknya. Pada tugas akhir ini, akan meninjau jaringan distribusi penyulang Tegalsari, Kota Surabaya. Dari sistem informasi geografis ini akan didapatkan data saluran berupa panjang saluran dan jenis kabel, selain itu juga didapatkan data rating beban yang berupa transformator distribusi.





Gambar 3.2 Tampilan Penyulang Tegalsari pada Sistem Informasi Geografis

### 3.2 Sistem Kelistrikan Penyulang Tegalsari

Jaringan penyulang Tegalsari memiliki topologi jaringan distribusi radial, dimana hanya disuplai dari satu sumber yaitu gardu induk Kupang. Level tegangan yang digunakan pada penyulang tegalsari ini adalah 20 kV, sesuai keluaran dari transformator daya pada gardu induk. Tugas akhir ini memodelkan sebuah tiang listrik pada penyulang ini sebagai sebuah bus, sedangkan sebuah trafo distribusi sebagai beban konstan impedansi.

Pada gambar 3.3 dapat dilihat terdapat 28 bus yang menunjukkan terdapat 28 tiang listrik pada level tegangan 20 kV di sepanjang penyulang tegalsari. Nama-nama dari seluruh bus tertera pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Daftar Nomor Tiang pada Penyulang Tegalsari

No Bus	No Tiang	No Bus	No Tiang
1	GI	15	TM23
2	TM3	16	TM24
3	TM4	17	TM27
4	TM7	18	TM28
5	TM8	19	TM29
6	TM9	20	TM37
7	TM11	21	TM44
8	TM12	22	TM45
9	TM13	23	TM56
10	TM15	24	TM58

Tabel 3. 2 Daftar Nomor Tiang pada Penyulang Tegalsari (Lanjutan)

11	TM16	25	TM59
12	TM17	26	TM61
13	TM18	27	TM62
14	TM19	28	TM63

Antara bus satu dengan yang lain terdapat saluran kabel udara dengan panjang tertentu, sehingga nilai impedansi antar saluran berbeda-beda tergantung dari panjang saluran.

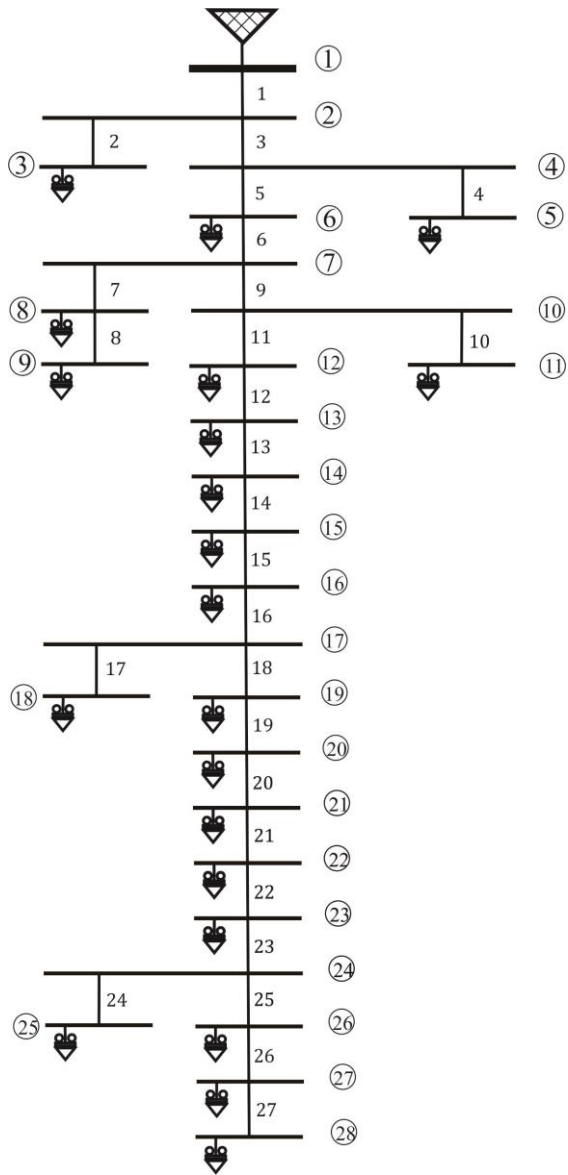
Tabel 3.3 Data Panjang Saluran Udara Penyulang Tegalsari

Bus Asal	Bus Tujuan	Panjang (m)
1	2	83,23
2	3	7,45
2	4	123,39
4	5	13,85
4	6	7,65
6	7	35,22
7	8	11,08
8	9	29,97
7	10	50,09
10	11	14,00
10	12	24,19
12	13	39,22
13	14	38,58
14	15	153,51
15	16	31,48
16	17	105,22
17	18	17,38
17	19	34,3
19	20	297,6
20	21	242,82
21	22	22,1
22	23	216,72
23	24	34,4
24	25	16,28
24	26	79,31
26	27	13,42
27	28	21,36

Pada sistem distribusi primer, terdapat transformator daya yang mengubah tegangan 20 kV menjadi 380/220 V untuk dikonsumsi oleh pelanggan listrik. Pada tugas akhir ini, memodelkan beban pada jaringan penyulang tegalsari berupa trafo daya tersebut. Pada sistem informasi geografis yang dikembangkan oleh PLN Area Distribusi Jawa Timur, data rating trafo distribusi masih dalam 3 fasa, sehingga batasan masalah pada tugas akhir ini adalah konsumsi beban setiap fasa sama atau sistem beban seimbang.

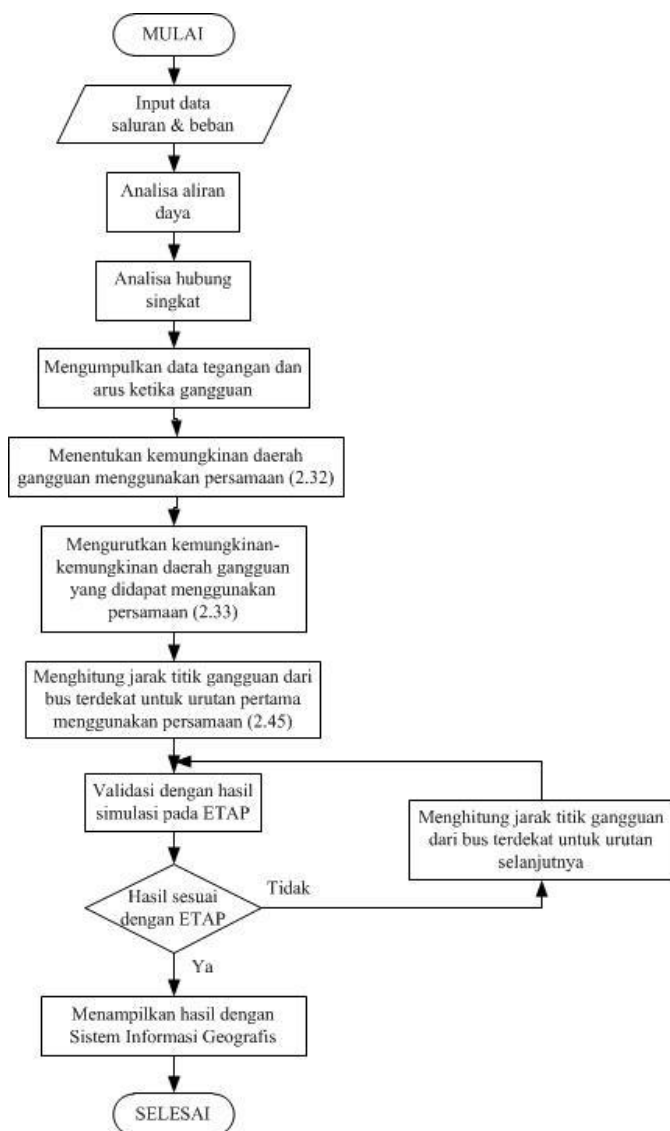
Tabel 3.4 Data Pembebanan Tiap Fasa pada Penyulang Tegalsari

No Bus	Nama Trafo	Daya Fasa R		Daya Fasa S		Daya Fasa T	
		P (kW)	Q (kVar)	P (kW)	Q (kVar)	P (kW)	Q (kVar)
3	AF137	79,167	26,021	79,167	26,021	79,167	26,021
5	AF138	79,167	26,021	79,167	26,021	79,167	26,021
6	AF164	50,667	16,653	50,667	16,653	50,667	16,653
8	AF139	50,667	16,653	50,667	16,653	50,667	16,653
9	AF140	47,5	15,612	47,5	15,612	47,5	15,612
11	AF142	15,833	5,204	15,833	5,204	15,833	5,204
12	AF657	15,833	5,204	15,833	5,204	15,833	5,204
13	AF143	63,333	20,817	63,333	20,817	63,333	20,817
14	AF730	31,667	10,408	31,667	10,408	31,667	10,408
15	AF144	31,667	10,408	31,667	10,408	31,667	10,408
16	AF718	50,667	16,653	50,667	16,653	50,667	16,653
18	AF668	50,667	16,653	50,667	16,653	50,667	16,653
19	AF145	23,75	7,806	23,75	7,806	23,75	7,806
20	AF148	50,667	16,653	50,667	16,653	50,667	16,653
21	AF149	39,583	13,010	39,583	13,010	39,583	13,010
22	AF150	79,167	26,021	79,167	26,021	79,167	26,021
23	AF153	63,333	20,817	63,333	20,817	63,333	20,817
25	AF154	63,333	20,817	63,333	20,817	63,333	20,817
26	AF156	15,833	5,204	15,833	5,204	15,833	5,204
27	AF157	79,167	26,021	79,167	26,021	79,167	26,021
28	AF158	10,133	3,331	10,133	3,331	10,133	3,331



Gambar 3.3 *Single Line Diagram* Jaringan Penyulang Tegalsari

### 3.3 Algoritma Penentuan Lokasi Gangguan



Gambar 3.4 Diagram Alir Metode Penentuan Lokasi Gangguan

Terdapat beberapa langkah yang harus dilakukan sebelum menentukan titik gangguan pada suatu jaringan distribusi. Langkah pertama adalah memodelkan sistem yang akan dianalisis. Dalam tugas akhir ini, untuk memodelkan sistem menggunakan data-data yang disediakan oleh sistem informasi geografis dari PT. PLN Area Distribusi Jawa Timur. Data tersebut berupa panjang saluran, jenis kabel saluran, jumlah tiang listrik yang akan dimodelkan sebagai bus, dan daya rating gardu distribusi yang akan dimodelkan sebagai beban.

Langkah selanjutnya adalah menganalisis aliran daya untuk mencari tegangan dan arus sebelum terjadi gangguan. Dalam tugas akhir ini, aliran daya dilakukan secara tiga fasa karena gangguan asimetri akan menyebabkan nilai arus dan tegangan antar fasa menjadi tidak sama besar atau dapat dikatakan sistem menjadi tidak seimbang. Nilai tegangan dapat diketahui menggunakan persamaan (2.11), sehingga nilai arus dapat dicari menggunakan persamaan (2.1).

Untuk mengetahui nilai kedip tegangan yang terjadi ketika gangguan, harus dilakukan analisis hubung singkat terlebih dahulu. Tujuan dari analisis hubung singkat ini adalah untuk mengetahui besarnya kedip tegangan atau nilai tegangan dan nilai arus pada titik pengukuran (Gardu Induk) saat terjadi gangguan. Analisis hubung singkat ini dilakukan dengan menganggap setiap bus terjadi hubung singkat secara bergantian, dan dianalisis semua jenis gangguan hubung singkat (satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, tiga fasa ke tanah, dan antar fasa). Pada bab sebelumnya telah dijelaskan bagaimana menghitung nilai tegangan dan arus pada bus yang terjadi gangguan. Dikarenakan jaringan penyulang tegalsari memiliki topologi radial, sehingga arus pada semua bus sama besar dengan nilai arus pada bus gangguan. Sedangkan untuk nilai tegangan pada titik pengukuran dapat dicari menggunakan persamaan

$$\Delta V_f^i = I^i Z_{X,p}^i \quad ; i = 0,1,2 \quad (3.1)$$

$$V_X^i = V_p^i + \Delta V_f^i \quad ; i = 0,1,2 \quad (3.2)$$

Dimana:

$\Delta V_f^i$  : Kedip tegangan urutan i saat terjadi gangguan

$I^i$  : Arus urutan i saat terjadi gangguan

$Z_{X,p}^i$  : Impedansi thevenin urutan i dari titik pengukuran hingga titik gangguan

$V_X^i$  : Tegangan urutan i pada titik pengukuran (Gardu Induk)

$V_p^i$  : Tegangan urutan i pada bus p (titik gangguan)

Setelah mendapatkan nilai kedip tegangan dan besar tegangan masing-masing urutan pada titik pengukuran, akan dapat dicari nilai tegangan masing-masing fasa dengan menggunakan matrik SCTM atau persamaan (2.16). Nilai tegangan dan arus pada titik pengukuran saat terjadi gangguan akan disimpan sebagai *database* yang akan digunakan untuk langkah selanjutnya, yaitu menentukan kemungkinan daerah gangguan.

Untuk menentukan kemungkinan-kemungkinan daerah gangguan, diperlukan masukan data berupa nilai tegangan dan arus fasa pada titik pengukuran. Nilai ini akan dibandingkan dengan nilai yang sudah tersimpan pada *database*, dimana akan terpilih suatu daerah gangguan jika memenuhi kondisi persamaan (2.32). Jika ditemukan lebih dari satu kemungkinan, maka akan dilakukan langkah selanjutnya yaitu pendekatan urutan kedip tegangan.

Pendekatan urutan kedip tegangan dilakukan dengan cara mengurutkan nilai dari persamaan (2.33) untuk masing-masing kemungkinan. Kemudian nilai paling kecil ditentukan sebagai urutan pertama, begitu seterusnya hingga kemungkinan dengan nilai terbesar.

Langkah selanjutnya yaitu menghitung jarak sesungguhnya titik gangguan. Perhitungan ini dilakukan menggunakan persamaan (2.45), dan hasilnya berupa jarak sesungguhnya (satuan dapat berupa meter) dari bus sebelum titik gangguan tersebut. Untuk memastikan jarak titik gangguan ini, harus dilakukan validasi dengan nilai hasil simulasi pada *software* ETAP 12.6. Jika ternyata jarak titik gangguan ini tidak sesuai dengan hasil yang ada pada ETAP 12.6, maka dilakukan perhitungan jarak titik gangguan untuk urutan selanjutnya, begitu terus hingga hasilnya sesuai.

Langkah terakhir yaitu menampilkan hasil penentuan titik gangguan pada sistem informasi geografis. Untuk menampilkan hasil tersebut harus menggunakan perangkat lunak yang digunakan untuk mengembangkan sistem informasi geografis oleh PT. PLN Area Distribusi Jawa Timur, *GNU Emacs 21.2*.

## BAB 4

### HASIL DAN ANALISIS

#### 4.1 Hasil Analisis Aliran Daya

Penyulang tegalsari memiliki 28 bus dengan konfigurasi 3 fasa radial, dan beban dianggap seimbang setiap fasanya. Langkah pertama untuk melakukan analisis aliran daya menggunakan metode *backward forward* adalah dengan memodelkan jalur saluran yang terhubung dalam jaringan penyulang tegalsari. Hal ini dapat direpresentasikan dengan matriks *BIBC*.

Besar arus dan sudut arus yang menuju pada setiap bus dapat diketahui dari analisis aliran daya, sesuai yang dijelaskan pada bab tinjauan pustaka. Total iterasi yang diperlukan untuk mencapai konvergensi menggunakan metode ini sebanyak 4 kali. Tabel 4.1 merupakan nilai arus pada setiap bus hasil dari analisis aliran daya menggunakan metode *backward forward*.

Tabel 4.1 Data Magnitudo dan Sudut Arus Hasil Analisis Aliran Daya Metode *Backward Forward*

Bus	Arus (L-N)					
	Fasa A		Fasa B		Fasa C	
	Mag (A)	Sudut	Mag (A)	Sudut	Mag (A)	Sudut
1	83.995	-18.186	83.995	-138.186	83.995	101.814
2	83.995	-18.186	83.995	-138.186	83.995	101.814
3	7.218	-18.192	7.218	-138.192	7.218	101.808
4	76.776	-18.186	76.776	-138.186	76.776	101.814
5	7.220	-18.190	7.220	-138.190	7.220	101.810
6	69.556	-18.185	69.556	-138.185	69.556	101.815
7	64.935	-18.185	64.935	-138.185	64.935	101.815
8	8.953	-18.187	8.953	-138.187	8.953	101.813
9	4.332	-18.188	4.332	-138.188	4.332	101.812
10	55.982	-18.185	55.982	-138.185	55.982	101.815
11	1.444	-18.180	1.444	-138.180	1.444	101.820
12	54.538	-18.185	54.538	-138.185	54.538	101.815
13	53.094	-18.185	53.094	-138.185	53.094	101.815
14	47.317	-18.184	47.317	-138.184	47.317	101.816
15	44.428	-18.184	44.428	-138.184	44.428	101.816



Tabel 4.1 Data Magnitudo dan Sudut Arus Hasil Analisis Aliran Daya Metode *Backward Forward* (Lanjutan)

Bus	Arus (L-N)					
	Fasa A		Fasa B		Fasa C	
	Mag (A)	Sudut	Mag (A)	Sudut	Mag (A)	Sudut
16	41.538	-18.183	41.538	-138.183	41.538	101.817
17	36.915	-18.183	36.915	-138.183	36.915	101.817
18	4.624	-18.182	4.624	-138.182	4.624	101.818
19	32.291	-18.183	32.291	-138.183	32.291	101.817
20	30.124	-18.183	30.124	-138.183	30.124	101.817
21	25.499	-18.183	25.499	-138.183	25.499	101.817
22	21.886	-18.183	21.886	-138.183	21.886	101.817
23	21.163	-18.183	21.163	-138.183	21.163	101.817
24	15.381	-18.182	15.381	-138.182	15.381	101.818
25	5.782	-18.186	5.782	-138.186	5.782	101.814
26	9.599	-18.180	9.599	-138.180	9.599	101.820
27	8.153	-18.181	8.153	-138.181	8.153	101.819
28	0.925	-18.184	0.925	-138.184	0.925	101.816

Setelah nilai arus didapat yaitu nilai yang terdapat pada tabel 4.1, maka akan dapat dicari nilai magnitudo dan sudut dari tegangan pada setiap bus. Iterasi atau pengulangan perhitungan nilai magnitudo dan sudut tegangan sebanyak empat kali. Hal ini akan meningkatkan tingkat akurasi atau ketepatan dari hasil analisis aliran daya. Tabel 4.2 adalah nilai magnitudo dan sudut tegangan fasa ke netral pada setiap bus dan setiap fasa.

Tabel 4.2 Data Magnitudo dan Sudut Tegangan Hasil Analisis Aliran Daya Metode *Backward Forward*

Bus	Tegangan (L-N)					
	Fasa A		Fasa B		Fasa C	
	Mag	Sudut	Mag	Sudut	Mag	Sudut
1	11.547	0.000	11.547	-120.000	11.547	120.000
2	11.545	-0.001	11.545	-120.001	11.545	119.999
3	11.545	-0.001	11.545	-120.001	11.545	119.999
4	11.542	-0.003	11.542	-120.003	11.542	119.997
5	11.542	-0.003	11.542	-120.003	11.542	119.997
6	11.542	-0.003	11.542	-120.003	11.542	119.997

Tabel 4.2 Data Magnitudo dan Sudut Tegangan Hasil Analisis Aliran Daya Metode *Backward Forward* (Lanjutan)

Bus	Tegangan (L-N)					
	Fasa A		Fasa B		Fasa C	
	Mag	Sudut	Mag	Sudut	Mag	Sudut
7	11.541	-0.004	11.541	-120.004	11.541	119.996
8	11.541	-0.004	11.541	-120.004	11.541	119.996
9	11.541	-0.004	11.541	-120.004	11.541	119.996
10	11.541	-0.004	11.541	-120.004	11.541	119.996
11	11.541	-0.004	11.541	-120.004	11.541	119.996
12	11.540	-0.005	11.540	-120.005	11.540	119.995
13	11.540	-0.005	11.540	-120.005	11.540	119.995
14	11.539	-0.006	11.539	-120.006	11.539	119.994
15	11.537	-0.007	11.537	-120.007	11.537	119.993
16	11.537	-0.007	11.537	-120.007	11.537	119.993
17	11.536	-0.008	11.536	-120.008	11.536	119.992
18	11.535	-0.008	11.535	-120.008	11.535	119.992
19	11.535	-0.008	11.535	-120.008	11.535	119.992
20	11.533	-0.010	11.533	-120.010	11.533	119.990
21	11.531	-0.011	11.531	-120.011	11.531	119.989
22	11.531	-0.011	11.531	-120.011	11.531	119.989
23	11.529	-0.012	11.529	-120.012	11.529	119.988
24	11.529	-0.012	11.529	-120.012	11.529	119.988
25	11.529	-0.012	11.529	-120.012	11.529	119.988
26	11.529	-0.013	11.529	-120.013	11.529	119.987
27	11.529	-0.013	11.529	-120.013	11.529	119.987
28	11.529	-0.013	11.529	-120.013	11.529	119.987

Nilai magnitudo dan sudut dari tegangan dan arus hasil analisis aliran daya menggunakan metode *backward forward* dibandingkan dengan hasil analisis aliran daya menggunakan *software* ETAP 12.6. Dari data magnitudo tegangan dan arus hasil analisis aliran daya dapat dilihat bahwa sistem seimbang karena magnitudo tegangan dan arus setiap fasa bernilai sama besar, hanya berbeda sudutnya. Oleh karena itu untuk mencari nilai error dari metode *backward forward* hanya ditinjau dari salah satu fasa saja.

Tabel 4.3 Data Error Magnitudo Tegangan dan Arus

Bus	Magnitudo Arus		Error (%)	Magnitudo Tegangan		Error (%)
	Hasil Metode	Hasil ETAP		Hasil Metode	Hasil ETAP	
1	83,995	83,842	0,18233	11,54701	11,54701	0
2	83,995	83,842	0,18233	11,54496	11,54497	0,00003
3	7,218	7,216	0,03906	11,54495	11,54495	0,00003
4	76,776	76,626	0,19581	11,54219	11,54220	0,00008
5	7,220	7,214	0,08726	11,54216	11,54217	0,00008
6	69,556	69,412	0,20710	11,54204	11,54205	0,00008
7	64,935	64,795	0,21546	11,54137	11,54138	0,0001
8	8,953	8,945	0,09977	11,54134	11,54135	0,00009
9	4,332	4,328	0,0976	11,54130	11,54131	0,0001
10	55,982	55,851	0,23399	11,54055	11,54056	0,00011
11	1,444	1,443	0,08727	11,54054	11,54056	0,00011
12	54,538	54,408	0,23789	11,54016	11,54018	0,00012
13	53,094	52,966	0,24181	11,53955	11,53957	0,00013
14	47,317	47,196	0,25595	11,53902	11,53904	0,00014
15	44,428	44,311	0,26291	11,53703	11,53705	0,00019
16	41,538	41,427	0,26845	11,53664	11,53667	0,0002
17	36,915	36,812	0,27914	11,53551	11,53554	0,00023
18	4,624	4,614	0,20329	11,53549	11,53551	0,00024
19	32,291	32,198	0,29001	11,53519	11,53521	0,00024
20	30,124	30,035	0,29577	11,53256	11,53260	0,00030
21	25,499	25,422	0,3034	11,53075	11,53079	0,00035
22	21,886	21,819	0,30806	11,53061	11,53065	0,00034
23	21,163	21,098	0,30796	11,52927	11,52932	0,00038
24	15,381	15,334	0,30922	11,52912	11,52916	0,00038
25	5,782	5,765	0,30771	11,52909	11,52914	0,00039
26	9,599	9,569	0,31019	11,52890	11,52894	0,00039
27	8,153	8,128	0,31388	11,52886	11,52891	0,0004
28	0,925	0,922	0,28451	11,52886	11,52890	0,0004

Dapat dilihat dari hasil atau tabel 4.3, bahwa simulasi yang dilakukan menggunakan metode *backward forward* memiliki *error* yang sangat kecil, dimana *error* terbesar yaitu 0,31388 %. Hal ini membuktikan

bahwa metode *backward forward* dapat digunakan untuk langkah selanjutnya, yaitu analisis hubung singkat.

#### 4.2 Hasil Analisis Hubung Singkat

Analisis hubung singkat dilakukan pada jaringan distribusi penyulang tegalsari dengan level tegangan 20 kV. Pada tugas akhir ini, akan dilakukan analisis hubung singkat pada setiap titik bus. Analisis dilakukan sesuai perhitungan yang telah dijelaskan pada bab tinjauan pustaka dengan *software GNU Emacs 21.2*. Langkah pertama sebelum dilakukan analisis hubung singkat adalah memodelkan sistem, kemudian analisis hubung singkat dilakukan untuk 4 jenis gangguan hubung singkat yaitu hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, tiga fasa ke tanah dan antar fasa. Hal ini bertujuan untuk mencari nilai arus hubung singkat dan nilai tegangan pada bus gangguan.

Setelah dilakukan analisis hubung singkat, kemudian akan dilakukan perhitungan kedip tegangan hingga ke titik pengukuran (Gardu Induk). Langkah analisis terakhir yaitu validasi dengan hasil simulasi hubung singkat menggunakan *software ETAP 12.6*. Tabel 4.4 merupakan data-data pada ETAP yang digunakan untuk memodelkan sistem.

Tabel 4.4 Data Simulasi Hubung Singkat pada ETAP 12.6

Data	Nilai
<b>A. Gardu Induk</b>	
Tegangan <i>Line to Line</i>	20 kV
MVAsc 3 Fasa	250
MVAsc 1 Fasa	83,3
X/R	10
<b>B. Kabel</b>	
Tipe	XLPE
Luas Penampang	150 mm <sup>2</sup>
Panjang	Sesuai data saluran
R urutan positif & negatif	0,265 $\Omega$ /km
R urutan nol	0,42 $\Omega$ /km
X urutan positif & negatif	0,13 $\Omega$ /km
X urutan nol	0,33 $\Omega$ /km

##### 4.2.1 Hasil Analisis Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Hubung singkat satu fasa ke tanah tidak hanya memunculkan arus dan tegangan urutan positif, akan tetapi urutan nol dan urutan negatif juga akan muncul akibat hubung singkat satu fasa ke tanah. Hal ini akan mengakibatkan ketidakseimbangan pada sistem saat terjadi gangguan.

Oleh karena itu, harus dilakukan perhitungan tegangan dan arus setiap urutan dengan menggunakan rumus perhitungan yang telah dijelaskan sebelumnya.

Sebagai contoh perhitungan, analisis hubung singkat satu fasa ke tanah saat terjadi gangguan pada bus 3. Untuk menghitung arus urutan, digunakan rumus (2.13), dibutuhkan impedansi thevenin urutan positif, negatif, dan nol. Untuk impedansi thevenin urutan positif dan negatif sebesar  $0,18323615 + j 1,6038479 \Omega$ . Sedangkan impedansi thevenin urutan nol sebesar  $0,19729155 + j 1,62198391 \Omega$ . Nilai arus urutan positif, negatif, dan nol untuk gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah adalah sama besar, yaitu

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{11,547}{0,56376385 + j 4,8296797} = 2,375 \angle -83,342^\circ \text{ kA}$$

Setelah arus urutan telah diketahui, maka tegangan urutan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.14)

$$V_1 = 11,547 - (2,375 \angle -83,342^\circ)(0,18323615 + j 1,6038479) = 7,7135 \angle -0,07^\circ \text{ kV}$$

$$V_2 = -(2,375 \angle -83,342^\circ)(0,18323615 + j 1,6038479) = 3,8335 \angle -179,86^\circ \text{ kV}$$

$$V_0 = -(1,432 \angle -83,718^\circ)(0,30343325 + j 2,6833625) = 3,8801 \angle 179,723^\circ \text{ kV}$$

Nilai arus fasa dan tegangan fasa dapat dicari menggunakan persamaan (2.15), berikut adalah nilai arus fasa dan tegangan fasa

$$I_a = 7,12416 \angle -83,342^\circ \text{ kA}$$

$$I_b = 0 \text{ kA}$$

$$I_c = 0 \text{ kA}$$

$$V_a = 0 \text{ kV}$$

$$V_b = 11,5456 \angle -120,27^\circ \text{ kV}$$

$$V_c = 11,5946 \angle 120,13^\circ \text{ kV}$$

Dilakukan perhitungan seperti di atas untuk setiap bus, sehingga akan didapatkan nilai tegangan dan arus di titik gangguan saat terjadi hubung singkat satu fasa ke tanah. Setelah didapatkan nilai tegangan dan arus di setiap bus gangguan saat terjadi gangguan, maka dilakukan validasi dengan hasil simulasi menggunakan *software* ETAP. Tabel 4.5 merupakan hasil perhitungan beserta validasi untuk nilai tegangan fasa dan arus fasa di titik gangguan saat terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

Tabel 4.5 Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Setiap Bus

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
1	A	0,000	0,00	0,00000	7,2169	7,217	0,00008
	B	11,547	11,55	0,00366	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,00146	0,0000	0,000	0,00000
2	A	0,000	0,00	0,00000	7,1318	7,132	0,00011
	B	11,546	11,55	0,00373	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,591	11,59	0,00152	0,0000	0,000	0,00000
3	A	0,000	0,00	0,00000	7,1242	7,124	0,00017
	B	11,546	11,55	0,00363	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,595	11,59	0,00162	0,0000	0,000	0,00000
4	A	0,000	0,00	0,00000	7,0064	7,006	0,00011
	B	11,547	11,55	0,00381	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,653	11,65	0,00135	0,0000	0,000	0,00000
5	A	0,000	0,00	0,00000	6,9924	6,992	0,00009
	B	11,548	11,55	0,00379	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,659	11,66	0,00141	0,0000	0,000	0,00000
6	A	0,000	0,00	0,00000	6,9986	6,999	0,00016
	B	11,548	11,55	0,00391	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,656	11,66	0,00123	0,0000	0,000	0,00000
7	A	0,000	0,00	0,00000	6,9631	6,963	0,00018
	B	11,549	11,55	0,00383	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,673	11,67	0,00127	0,0000	0,000	0,00000
8	A	0,000	0,00	0,00000	6,9519	6,952	0,00170
	B	11,549	11,55	0,00456	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,679	11,68	0,00152	0,0000	0,000	0,00000
9	A	0,000	0,00	0,00000	6,9217	6,922	0,00154
	B	11,550	11,55	0,00441	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,693	11,69	0,00149	0,0000	0,000	0,00000

Tabel 4.5 Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
10	A	0,000	0,00	0,00000	6,9127	6,913	0,00026
	B	11,551	11,55	0,00376	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,697	11,70	0,00138	0,0000	0,000	0,00000
11	A	0,000	0,00	0,00000	6,8986	6,899	0,00026
	B	11,552	11,55	0,00384	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,703	11,70	0,00136	0,0000	0,000	0,00000
12	A	0,000	0,00	0,00000	6,8884	6,888	0,00011
	B	11,552	11,55	0,00371	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,708	11,71	0,00129	0,0000	0,000	0,00000
13	A	0,000	0,00	0,00000	6,8492	6,849	0,00012
	B	11,554	11,55	0,00365	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,726	11,73	0,00136	0,0000	0,000	0,00000
14	A	0,000	0,00	0,00000	6,8108	6,811	0,00040
	B	11,557	11,56	0,00364	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,743	11,74	0,00140	0,0000	0,000	0,00000
15	A	0,000	0,00	0,00000	6,6596	6,660	0,00025
	B	11,569	11,57	0,00370	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,808	11,81	0,00130	0,0000	0,000	0,00000
16	A	0,000	0,00	0,00000	6,6289	6,629	0,00032
	B	11,572	11,57	0,00370	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,821	11,82	0,00129	0,0000	0,000	0,00000
17	A	0,000	0,00	0,00000	6,5273	6,527	0,00036
	B	11,583	11,58	0,00364	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,862	11,86	0,00130	0,0000	0,000	0,00000
18	A	0,000	0,00	0,00000	6,5107	6,511	0,00040
	B	11,585	11,59	0,00360	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,869	11,87	0,00119	0,0000	0,000	0,00000
19	A	0,000	0,00	0,00000	6,4945	6,495	0,00021
	B	11,587	11,59	0,00378	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,875	11,88	0,00118	0,0000	0,000	0,00000

Tabel 4.5 Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
20	A	0,000	0,00	0,00000	6,2168	6,217	0,00015
	B	11,627	11,63	0,00372	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,978	11,98	0,00118	0,0000	0,000	0,00000
21	A	0,000	0,00	0,00000	6,0000	6,000	0,00006
	B	11,666	11,67	0,00377	0,0000	0,000	0,00000
	C	12,051	12,05	0,00103	0,0000	0,000	0,00000
22	A	0,000	0,00	0,00000	5,9807	5,981	0,00018
	B	11,669	11,67	0,00376	0,0000	0,000	0,00000
	C	12,057	12,06	0,00103	0,0000	0,000	0,00000
23	A	0,000	0,00	0,00000	5,7958	5,796	0,00028
	B	11,707	11,71	0,00384	0,0000	0,000	0,00000
	C	12,113	12,11	0,00097	0,0000	0,000	0,00000
24	A	0,000	0,00	0,00000	5,7671	5,767	0,00031
	B	11,713	11,71	0,00392	0,0000	0,000	0,00000
	C	12,121	12,12	0,00099	0,0000	0,000	0,00000
25	A	0,000	0,00	0,00000	5,7536	5,754	0,00027
	B	11,716	11,72	0,00372	0,0000	0,000	0,00000
	C	12,125	12,13	0,00101	0,0000	0,000	0,00000
26	A	0,000	0,00	0,00000	5,7017	5,702	0,00032
	B	11,728	11,73	0,00388	0,0000	0,000	0,00000
	C	12,140	12,14	0,00087	0,0000	0,000	0,00000
27	A	0,000	0,00	0,00000	5,6908	5,691	0,00039
	B	11,730	11,73	0,00405	0,0000	0,000	0,00000
	C	12,143	12,14	0,00089	0,0000	0,000	0,00000
28	A	0,000	0,00	0,00000	5,6734	5,673	0,00028
	B	11,734	11,73	0,00394	0,0000	0,000	0,00000
	C	12,148	12,15	0,00089	0,0000	0,000	0,00000

Dapat dilihat pada tabel 4.5, bahwa fasa yang terganggu (fasa A) memiliki tegangan 0 kV, sedangkan pada fasa yang tidak terganggu (fasa B dan C) tidak terdapat arus yang mengalir. Hal ini dikarenakan semua arus menuju titik gangguan yaitu fasa A, dan di fasa A tegangan akan



sama dengan tegangan *ground* yaitu 0 kV. Dapat dilihat pula dari tabel yang sama, *error* terbesar untuk tegangan adalah 0,00394 % yaitu ketika bus 28 merupakan titik gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah. Sedangkan pada arus *error* terbesar pada bus 8 ketika menjadi titik gangguan, yaitu sebesar 0,0017 %. Hal ini menunjukkan bahwa metode hubung singkat yang diteliti dapat digunakan untuk langkah selanjutnya karena *error* yang kecil.

#### **4.2.2 Hasil Analisis Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah**

Analisis hubung singkat dua fasa ke tanah dilakukan dengan mencari nilai arus urutan nol, positif dan negatif pada saat terjadi hubung singkat di suatu titik. Hal ini perlu dilakukan karena hubung singkat dua fasa ke tanah akan memunculkan arus urutan nol dan negatif, yang akan membuat sistem menjadi tidak seimbang.

Sebagai contoh, terjadi hubung singkat dua fasa ke tanah pada bus 3. Perhitungan arus urutan positif menggunakan persamaan (2.25), sehingga akan didapatkan arus urutan positif sama dengan 4,75908 kA. Hasil perhitungan arus urutan positif didapat, akan digunakan untuk menghitung arus urutan negatif sesuai persamaan (2.24), sehingga nilai arus urutan negatif adalah 2,39396 kA. Arus urutan nol akan dapat dihitung sesuai persamaan (2.23), sehingga didapat arus urutan nol sebesar 2,36516 kA. Setelah didapat besar arus urutan, nilai tegangan urutan akan dapat dicari dengan persamaan (2.14), sehingga akan didapatkan tegangan urutan positif, negatif, dan nol yang nilainya sama besar yaitu 3,86452 kV.

Perhitungan dilakukan untuk setiap bus, sehingga akan didapatkan tegangan dan arus hubung singkat di setiap bus. Kemudian nilai-nilai ini akan diuji kebenarannya dengan dibandingkan dengan hasil simulasi di ETAP. Tabel 4.6 akan menunjukkan validitas dari metode yang diterapkan pada analisis hubung singkat dua fasa ke tanah ini dengan menguji nilai tegangan dan arus fasa ketika terjadi hubung singkat dua fasa ke tanah pada setiap titik bus. Untuk hasil perhitungan dan validasi tegangan dan arus urutan hubung singkat dapat dilihat pada lembar lampiran. Hasil tersebut dasar dari perhitungan tegangan dan arus fasa saat terjadi hubung singkat

Tabel 4.6 Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Setiap Bus

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
1	A	11,547	11,55	0,00001	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	7,2166	7,217	0,00368
	C	0,000	0,00	0,00000	7,2168	7,217	0,00148
2	A	11,590	11,59	0,00004	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	7,1587	7,159	0,00357
	C	0,000	0,00	0,00000	7,1311	7,131	0,00143
3	A	11,594	11,59	0,00007	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	7,1534	7,154	0,00360
	C	0,000	0,00	0,00000	7,1235	7,124	0,00127
4	A	11,652	11,65	0,00009	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	7,0707	7,071	0,00347
	C	0,000	0,00	0,00000	7,0071	7,007	0,00155
5	A	11,659	11,66	0,00011	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	7,0607	7,061	0,00356
	C	0,000	0,00	0,00000	6,9934	6,994	0,00152
6	A	11,656	11,66	0,00003	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	7,0652	7,065	0,00363
	C	0,000	0,00	0,00000	6,9995	7,000	0,00190
7	A	11,674	11,67	0,00007	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	7,0397	7,040	0,00364
	C	0,000	0,00	0,00000	6,9648	6,965	0,00186
8	A	11,679	11,68	0,00079	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	7,0316	7,032	0,00540
	C	0,000	0,00	0,00000	6,9540	6,954	0,00407
9	A	11,694	11,69	0,00080	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	7,0097	7,010	0,00528
	C	0,000	0,00	0,00000	6,9247	6,925	0,00381
10	A	11,699	11,70	0,00001	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	7,0031	7,003	0,00385
	C	0,000	0,00	0,00000	6,9160	6,916	0,00187

Tabel 4.6 Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
11	A	11,706	11,71	0,00009	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,9929	6,993	0,00385
	C	0,000	0,00	0,00000	6,9024	6,903	0,00187
12	A	11,711	11,71	0,00013	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,9854	6,986	0,00364
	C	0,000	0,00	0,00000	6,8926	6,893	0,00160
13	A	11,730	11,73	0,00016	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,9565	6,957	0,00364
	C	0,000	0,00	0,00000	6,8549	6,855	0,00156
14	A	11,748	11,75	0,00005	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,9279	6,928	0,00396
	C	0,000	0,00	0,00000	6,8182	6,818	0,00188
15	A	11,821	11,82	0,00014	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,8132	6,813	0,00371
	C	0,000	0,00	0,00000	6,6754	6,675	0,00176
16	A	11,836	11,84	0,00005	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,7895	6,790	0,00383
	C	0,000	0,00	0,00000	6,6467	6,647	0,00188
17	A	11,884	11,88	0,00010	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,7101	6,710	0,00387
	C	0,000	0,00	0,00000	6,5524	6,553	0,00185
18	A	11,892	11,89	0,00020	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,6969	6,697	0,00380
	C	0,000	0,00	0,00000	6,5370	6,537	0,00187
19	A	11,900	11,90	0,00020	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,6841	6,684	0,00359
	C	0,000	0,00	0,00000	6,5222	6,522	0,00180
20	A	12,027	12,03	0,00014	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,4586	6,459	0,00358
	C	0,000	0,00	0,00000	6,2696	6,270	0,00171

Tabel 4.6 Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
21	A	12,122	12,12	0,00022	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,2760	6,276	0,00334
	C	0,000	0,00	0,00000	6,0758	6,076	0,00162
22	A	12,130	12,13	0,00024	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,2595	6,260	0,00337
	C	0,000	0,00	0,00000	6,0586	6,059	0,00182
23	A	12,209	12,21	0,00019	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,0992	6,099	0,00351
	C	0,000	0,00	0,00000	5,8951	5,895	0,00201
24	A	12,221	12,22	0,00016	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,0740	6,074	0,00352
	C	0,000	0,00	0,00000	5,8699	5,870	0,00209
25	A	12,226	12,23	0,00021	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,0622	6,062	0,00355
	C	0,000	0,00	0,00000	5,8580	5,858	0,00188
26	A	12,248	12,25	0,00026	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,0163	6,017	0,00347
	C	0,000	0,00	0,00000	5,8123	5,812	0,00212
27	A	12,252	12,25	0,00016	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	6,0066	6,007	0,00356
	C	0,000	0,00	0,00000	5,8027	5,803	0,00228
28	A	12,259	12,26	0,00018	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	5,9912	5,991	0,00342
	C	0,000	0,00	0,00000	5,7874	5,788	0,00215

Dapat dilihat dari tabel 4.6, bahwa pada fasa yang terganggu (fasa B dan fasa C) tidak bertegangan, hal ini dikarenakan fasa-fasa tersebut memiliki tegangan yang sama dengan ground karena terhubung langsung ke tanah. Sedangkan untuk arus pada fasa yang tidak terganggu (fasa A) sama dengan nol karena arus pada fasa tersebut menuju fasa yang terganggu. Dari tabel 4.6 juga dapat dilihat bahwa *error* yang terjadi sangat kecil, sehingga metode hubung singkat dua fasa ke tanah ini dapat

digunakan untuk melakukan analisa lebih lanjut, yaitu pembentukan database tegangan dan arus pada gardu induk saat terjadi gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

#### 4.2.3 Hasil Analisis Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

Gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah merupakan gangguan simetri, dimana tidak terjadi ketidakseimbangan pada sistem. Dengan kata lain, pada hubung singkat ini tidak muncul arus dan tegangan urutan nol dan negatif. Oleh karena itu analisis hubung singkat tiga fasa ke tanah hanya meninjau tegangan dan arus fasa.

Sebagai contoh perhitungan, terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah pada bus 3. Dimana impedansi thevenin pada bus 3 adalah  $0,18323615 + j 1,6038479 \Omega$ . Sehingga arus hubung singkat tiga fasa ke tanah pada bus 3 adalah

$$I_f^3 = \frac{11,547}{0,18323615 + j 1,6038479 \Omega} = 7.15303247 \angle -83,482^\circ \text{ kA}$$

Tegangan pada bus 3 saat terjadi hubung singkat tiga fasa ke tanah sama dengan nol. Hal ini berlaku pada semua bus dan setiap fasa jika terjadi hubung singkat tiga fasa ke tanah.

Perhitungan ini dilakukan pada setiap bus untuk mencari arus hubung singkat tiga fasa ke tanah di setiap bus. Hasil yang didapat kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi pada ETAP.

Tabel 4.7 Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Setiap Bus

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
1	A	0	0	0	7,2169	7,217	0,00001
	B	0	0	0	7,2169	7,217	0,00001
	C	0	0	0	7,2169	7,217	0,00001
2	A	0	0	0	7,1583	7,158	0,00003
	B	0	0	0	7,1583	7,158	0,00003
	C	0	0	0	7,1583	7,158	0,00003
3	A	0	0	0	7,1530	7,153	0,00009
	B	0	0	0	7,1530	7,153	0,00009
	C	0	0	0	7,1530	7,153	0,00009

Tabel 4.7 Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)
4	A	0	0	0	7,0710	7,071	0,00001
	B	0	0	0	7,0710	7,071	0,00001
	C	0	0	0	7,0710	7,071	0,00001
5	A	0	0	0	7,0612	7,061	0,00002
	B	0	0	0	7,0612	7,061	0,00002
	C	0	0	0	7,0612	7,061	0,00002
6	A	0	0	0	7,0656	7,066	0,00025
	B	0	0	0	7,0656	7,066	0,00025
	C	0	0	0	7,0656	7,066	0,00025
7	A	0	0	0	7,0407	7,041	0,00019
	B	0	0	0	7,0407	7,041	0,00019
	C	0	0	0	7,0407	7,041	0,00019
8	A	0	0	0	7,0328	7,033	0,00017
	B	0	0	0	7,0328	7,033	0,00017
	C	0	0	0	7,0328	7,033	0,00017
9	A	0	0	0	7,0115	7,012	0,00004
	B	0	0	0	7,0115	7,012	0,00004
	C	0	0	0	7,0115	7,012	0,00004
10	A	0	0	0	7,0051	7,005	0,00023
	B	0	0	0	7,0051	7,005	0,00023
	C	0	0	0	7,0051	7,005	0,00023
11	A	0	0	0	6,9952	6,995	0,00023
	B	0	0	0	6,9952	6,995	0,00023
	C	0	0	0	6,9952	6,995	0,00023
12	A	0	0	0	6,9880	6,988	0,00009
	B	0	0	0	6,9880	6,988	0,00009
	C	0	0	0	6,9880	6,988	0,00009
13	A	0	0	0	6,9601	6,960	0,00015
	B	0	0	0	6,9601	6,960	0,00015
	C	0	0	0	6,9601	6,960	0,00015

Tabel 4.7 Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
14	A	0	0	0	6,9327	6,933	0,00039
	B	0	0	0	6,9327	6,933	0,00039
	C	0	0	0	6,9327	6,933	0,00039
15	A	0	0	0	6,8238	6,824	0,00060
	B	0	0	0	6,8238	6,824	0,00060
	C	0	0	0	6,8238	6,824	0,00060
16	A	0	0	0	6,8015	6,801	0,00044
	B	0	0	0	6,8015	6,801	0,00044
	C	0	0	0	6,8015	6,801	0,00044
17	A	0	0	0	6,7270	6,727	0,00046
	B	0	0	0	6,7270	6,727	0,00046
	C	0	0	0	6,7270	6,727	0,00046
18	A	0	0	0	6,7147	6,715	0,00056
	B	0	0	0	6,7147	6,715	0,00056
	C	0	0	0	6,7147	6,715	0,00056
19	A	0	0	0	6,7028	6,703	0,00054
	B	0	0	0	6,7028	6,703	0,00054
	C	0	0	0	6,7028	6,703	0,00054
20	A	0	0	0	6,4942	6,494	0,00056
	B	0	0	0	6,4942	6,494	0,00056
	C	0	0	0	6,4942	6,494	0,00056
21	A	0	0	0	6,3269	6,327	0,00061
	B	0	0	0	6,3269	6,327	0,00061
	C	0	0	0	6,3269	6,327	0,00061
22	A	0	0	0	6,3118	6,312	0,00049
	B	0	0	0	6,3118	6,312	0,00049
	C	0	0	0	6,3118	6,312	0,00049
23	A	0	0	0	6,1655	6,165	0,00028
	B	0	0	0	6,1655	6,165	0,00028
	C	0	0	0	6,1655	6,165	0,00028

Tabel 4.7 Hasil Tegangan dan Arus Fasa saat Terjadi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
24	A	0	0	0	6,1425	6,143	0,00023
	B	0	0	0	6,1425	6,143	0,00023
	C	0	0	0	6,1425	6,143	0,00023
25	A	0	0	0	6,1317	6,132	0,00034
	B	0	0	0	6,1317	6,132	0,00034
	C	0	0	0	6,1317	6,132	0,00034
26	A	0	0	0	6,0899	6,090	0,00025
	B	0	0	0	6,0899	6,090	0,00025
	C	0	0	0	6,0899	6,090	0,00025
27	A	0	0	0	6,0810	6,081	0,00008
	B	0	0	0	6,0810	6,081	0,00008
	C	0	0	0	6,0810	6,081	0,00008
28	A	0	0	0	6,0670	6,067	0,00023
	B	0	0	0	6,0670	6,067	0,00023
	C	0	0	0	6,0670	6,067	0,00023

Dapat dianalisis berdasarkan hasil metode atau pada tabel 4.7, bahwa tegangan pada titik gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah bernilai nol di setiap fasanya, hal ini dikarenakan seluruh fasanya terhubung langsung ke tanah yang tidak bertegangan. Sedangkan untuk arus, semua fasanya bernilai sama dikarenakan tidak munculnya arus urutan negatif dan nol atau dengan kata lain gangguan simetri. Hasil *error* yang didapat sangat kecil, sehingga hasil metode hubung singkat ini dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

#### 4.2.4 Hasil Analisis Hubung Singkat Antar Fasa

Analisis hubung singkat antar fasa dilakukan dengan perhitungan arus urutan terlebih dahulu. Hal ini dikarenakan hubung singkat antar fasa tidak hanya memunculkan arus dan tegangan urutan positif, akan tetapi arus dan tegangan urutan negatif juga muncul. Urutan nol tidak muncul pada hubung singkat ini dikarenakan tidak adanya hubungan ke tanah secara langsung.

Sebagai contoh analisis, terjadi gangguan hubung singkat antara fasa b dan c pada bus 3. Untuk mencari nilai arus urutan positif, digunakan



persamaan (2.31), sehingga didapatkan arus urutan positif sebesar 3,57652 kA. Nilai arus urutan negatif sama besar dengan urutan positif, akan tetapi sudut fasanya berbeda 180°. Mencari tegangan urutan positif dan negatif menggunakan persamaan (2.14), dan didapatkan hasil tegangan urutan positif sebesar 5,77350 kV, yang nilainya sama besar dengan tegangan urutan negatif.

Kemudian perhitungan tersebut dilakukan untuk menganalisis hubung singkat di setiap bus. Hasil yang didapat pada metode ini kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi pada ETAP. Dua tabel berikut menampilkan perbandingan hasil metode analisis hubung singkat antar fasa dengan hasil simulasi ETAP, yang dilakukan pada setiap bus.

Tabel 4.8 Hasil Tegangan dan Arus Fasa Saat Terjadi Hubung Singkat Antar Fasa pada Setiap Bus

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
1	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,2498	6,250	0,00293
	C	5,773	5,77	0,0044	6,2498	6,250	0,00293
2	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,1991	6,199	0,00289
	C	5,773	5,77	0,0044	6,1991	6,199	0,00289
3	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,1945	6,195	0,00284
	C	5,773	5,77	0,0044	6,1945	6,195	0,00284
4	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,1235	6,124	0,00292
	C	5,773	5,77	0,0044	6,1235	6,124	0,00292
5	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,1150	6,115	0,00296
	C	5,773	5,77	0,0044	6,1150	6,115	0,00296
6	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,1188	6,119	0,00318
	C	5,773	5,77	0,0044	6,1188	6,119	0,00318

Tabel 4.8 Hasil Tegangan dan Arus Fasa Saat Terjadi Hubung Singkat Antar Fasa pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
7	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,0972	6,097	0,00312
	C	5,773	5,77	0,0044	6,0972	6,097	0,00312
8	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,0904	6,091	0,00551
	C	5,773	5,77	0,0044	6,0904	6,091	0,00551
9	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,0720	6,072	0,00529
	C	5,773	5,77	0,0044	6,0720	6,072	0,00529
10	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,0664	6,067	0,00325
	C	5,773	5,77	0,0044	6,0664	6,067	0,00325
11	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,0578	6,058	0,00325
	C	5,773	5,77	0,0044	6,0578	6,058	0,00325
12	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,0516	6,052	0,00294
	C	5,773	5,77	0,0044	6,0516	6,052	0,00294
13	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,0275	6,028	0,00289
	C	5,773	5,77	0,0044	6,0275	6,028	0,00289
14	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	6,0037	6,004	0,00324
	C	5,773	5,77	0,0044	6,0037	6,004	0,00324
15	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,9094	5,910	0,00302
	C	5,773	5,77	0,0044	5,9094	5,910	0,00302
16	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,8901	5,890	0,00319
	C	5,773	5,77	0,0044	5,8901	5,890	0,00319

Tabel 4.8 Hasil Tegangan dan Arus Fasa Saat Terjadi Hubung Singkat Antar Fasa pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
17	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,8256	5,826	0,00315
	C	5,773	5,77	0,0044	5,8256	5,826	0,00315
18	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,8150	5,815	0,00306
	C	5,773	5,77	0,0044	5,8150	5,815	0,00306
19	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,8046	5,805	0,00297
	C	5,773	5,77	0,0044	5,8046	5,805	0,00297
20	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,6240	5,624	0,00292
	C	5,773	5,77	0,0044	5,6240	5,624	0,00292
21	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,4791	5,479	0,00270
	C	5,773	5,77	0,0044	5,4791	5,479	0,00270
22	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,4660	5,466	0,00282
	C	5,773	5,77	0,0044	5,4660	5,466	0,00282
23	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,3393	5,339	0,00301
	C	5,773	5,77	0,0044	5,3393	5,339	0,00301
24	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,3194	5,320	0,00305
	C	5,773	5,77	0,0044	5,3194	5,320	0,00305
25	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,3100	5,310	0,00294
	C	5,773	5,77	0,0044	5,3100	5,310	0,00294
26	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,2739	5,274	0,00301
	C	5,773	5,77	0,0044	5,2739	5,274	0,00301

Tabel 4.8 Hasil Tegangan dan Arus Fasa Saat Terjadi Hubung Singkat Antar Fasa pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
27	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,2662	5,266	0,00318
	C	5,773	5,77	0,0044	5,2662	5,266	0,00318
28	A	11,547	11,55	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,0044	5,2540	5,254	0,00303
	C	5,773	5,77	0,0044	5,2540	5,254	0,00303

Dapat dilihat dari Tabel 4.8 yang merupakan hasil metode hubung singkat antar fasa, bahwa hasil tegangan pada fasa yang tidak terganggu bernilai 11,547 kV atau tidak berubah dari tegangan normal, akan tetapi berbeda dengan gangguan hubung singkat ke tanah, tegangan pada fasa yang tidak terganggu tidak bernilai nol hal ini dikarenakan tidak ada fasa yang terhubung ke tanah secara langsung. Arus pada fasa yang tidak terganggu akan bernilai nol karena arus tersebut menuju fasa yang terganggu. Dapat dilihat pula, bahwa *error* yang terjadi sangat kecil, sehingga metode hubung singkat antar fasa ini dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

#### 4.3 Pembentukan *Database* Tegangan GI

Hubung Singkat jenis apapun dan di titik manapun, akan mengakibatkan adanya kedip tegangan (*voltage sags*). Akan tetapi tidak mungkin meletakkan pengukur tegangan di setiap titik untuk mencari lokasi gangguan. Pada umumnya alat ukur tegangan diletakkan di gardu induk, sehingga kita harus mencari nilai tegangan pada titik gardu induk.

Harus dilakukan analisis kedip tegangan pada gardu induk untuk semua jenis gangguan yang terjadi di setiap titik. Sehingga akan didapatkan kumpulan nilai tegangan dan arus pada gardu induk saat terjadi hubung singkat. Kumpulan nilai tegangan dan arus pada gardu induk tersebut akan dibentuk sebagai *database* yang akan digunakan untuk pada penentuan lokasi gangguan.

Konsep yang digunakan dalam perhitungan kedip tegangan untuk semua jenis gangguan adalah sama, yaitu dianalisis melalui tegangan urutan. Dengan menggunakan persamaan (3.1) akan diketahui kedip tegangan ketika terjadi gangguan hubung singkat untuk semua titik.

Untuk mengetahui nilai tegangan pada gardu induk saat terjadi gangguan, digunakan persamaan (3.2).

Sebagai contoh analisis keding tegangan, terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah di bus 3. Tegangan urutan positif, negatif, dan nol pada bus 3 saat terjadi gangguan secara berurutan yaitu 7,714 kV, 3,833 kV, dan 3,880 kV. Sedangkan arus urutan positif, negatif, dan nol bernilai sama besar yaitu 2,3747 kA. Impedansi urutan positif, negatif, dan nol dari GI (bus 1) hingga bus 3 secara berurutan yaitu  $0.02403 + j 0.0117884 \Omega$ ,  $0.02403 + j 0.0117884 \Omega$ , dan  $0.0380856 + j 0.0299244 \Omega$ . Nilai keding tegangan urutan positif dan negatif sebesar 0,03391 kV, dan urutan nol sebesar 0,08059 kV. Sehingga tegangan akhir GI urutan positif, negatif, dan nol secara berurutan yaitu 3,79955 kV, 7,74823 kV, 3,79955 kV. Setelah tegangan urutan telah didapat, akan dapat menghitung tegangan fasa menggunakan persamaan (2.16). Tegangan pada GI fasa a, b, dan c secara berurutan yaitu 0,000 kV, 11,546 kV, 11,595 kV.

Perhitungan dilakukan juga untuk setiap bus, dan setiap jenis gangguan. Akan didapatkan kumpulan nilai tegangan akhir pada GI untuk setiap jenis gangguan. Kumpulan nilai tersebut akan dibentuk sebagai *database* tegangan. Setelah didapat semua *database*, nilai tersebut akan divalidasi dengan hasil simulasi pada ETAP. Tabel 4.9 menunjukkan hasil *database* beserta validasinya untuk tegangan GI saat terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

Tabel 4.9 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk Saat Terjadi Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Setiap Bus

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
1	A	0,000	0,00	0,00000	7,2169	7,217	0,00001
	B	11,547	11,55	0,02959	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02739	0,0000	0,000	0,00000
2	A	0,221	0,22	0,57540	7,1318	7,132	0,00011
	B	11,547	11,55	0,02958	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02742	0,0000	0,000	0,00000
3	A	0,241	0,24	0,33945	7,1242	7,124	0,00017
	B	11,547	11,55	0,02958	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02742	0,0000	0,000	0,00000

Tabel 4.9 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk Saat Terjadi Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
4	A	0,540	0,54	0,06703	7,0064	7,006	0,00011
	B	11,547	11,55	0,02957	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02746	0,0000	0,000	0,00000
5	A	0,575	0,57	0,81748	6,9924	6,992	0,00009
	B	11,547	11,55	0,02957	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02747	0,0000	0,000	0,00000
6	A	0,559	0,56	0,17861	6,9986	6,999	0,00016
	B	11,547	11,55	0,02957	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02746	0,0000	0,000	0,00000
7	A	0,648	0,65	0,37285	6,9631	6,963	0,00018
	B	11,547	11,55	0,02957	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02747	0,0000	0,000	0,00000
8	A	0,675	0,68	0,69835	6,9519	6,952	0,00170
	B	11,547	11,55	0,02956	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02748	0,0000	0,000	0,00000
9	A	0,750	0,75	0,04646	6,9217	6,922	0,00154
	B	11,547	11,55	0,02956	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02749	0,0000	0,000	0,00000
10	A	0,772	0,77	0,25492	6,9127	6,913	0,00026
	B	11,547	11,55	0,02956	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02749	0,0000	0,000	0,00000
11	A	0,806	0,81	0,44484	6,8986	6,899	0,00026
	B	11,547	11,55	0,02956	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02749	0,0000	0,000	0,00000
12	A	0,831	0,83	0,16494	6,8884	6,888	0,00011
	B	11,547	11,55	0,02956	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02750	0,0000	0,000	0,00000
13	A	0,927	0,93	0,34700	6,8492	6,849	0,00012
	B	11,547	11,55	0,02956	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02751	0,0000	0,000	0,00000

Tabel 4.9 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk Saat Terjadi Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
14	A	1,020	1,02	0,04663	6,8108	6,811	0,00040
	B	11,547	11,55	0,02955	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02752	0,0000	0,000	0,00000
15	A	1,378	1,38	0,14682	6,6596	6,660	0,00025
	B	11,547	11,55	0,02954	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02756	0,0000	0,000	0,00000
16	A	1,449	1,45	0,04022	6,6289	6,629	0,00032
	B	11,547	11,55	0,02954	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02757	0,0000	0,000	0,00000
17	A	1,683	1,68	0,19176	6,5273	6,527	0,00036
	B	11,547	11,55	0,02953	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02760	0,0000	0,000	0,00000
18	A	1,721	1,72	0,06457	6,5107	6,511	0,00040
	B	11,547	11,55	0,02953	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02761	0,0000	0,000	0,00000
19	A	1,758	1,76	0,12498	6,4945	6,495	0,00021
	B	11,547	11,55	0,02953	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02761	0,0000	0,000	0,00000
20	A	2,372	2,37	0,09716	6,2168	6,217	0,00015
	B	11,547	11,55	0,02953	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02768	0,0000	0,000	0,00000
21	A	2,833	2,83	0,09424	6,0000	6,000	0,00006
	B	11,547	11,55	0,02952	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02773	0,0000	0,000	0,00000
22	A	2,873	2,87	0,09883	5,9807	5,981	0,00018
	B	11,547	11,55	0,02952	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02774	0,0000	0,000	0,00000
23	A	3,252	3,25	0,06814	5,7958	5,796	0,00028
	B	11,547	11,55	0,02952	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02778	0,0000	0,000	0,00000

Tabel 4.9 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk Saat Terjadi Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
24	A	3,310	3,31	0,00237	5,7671	5,767	0,00031
	B	11,547	11,55	0,02953	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02779	0,0000	0,000	0,00000
25	A	3,337	3,34	0,08249	5,7536	5,754	0,00027
	B	11,547	11,55	0,02953	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02779	0,0000	0,000	0,00000
26	A	3,441	3,44	0,03246	5,7017	5,702	0,00032
	B	11,547	11,55	0,02953	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02780	0,0000	0,000	0,00000
27	A	3,463	3,46	0,08576	5,6908	5,691	0,00039
	B	11,547	11,55	0,02953	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02780	0,0000	0,000	0,00000
28	A	3,498	3,50	0,06982	5,6734	5,673	0,00028
	B	11,547	11,55	0,02953	0,0000	0,000	0,00000
	C	11,547	11,55	0,02781	0,0000	0,000	0,00000

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada tabel 4.9, dapat dianalisa bahwa kedip tegangan yang terjadi pada gardu induk saat terjadi hubung singkat satu fasa ke tanah hanya terjadi di fasa yang terganggu (pada kasus ini fasa A), dan begitu juga untuk arus yang hanya terdapat pada fasa terganggu. Maka dari itu, *database* yang akan digunakan untuk metode penentuan lokasi gangguan hanya pada fasa yang terganggu (fasa A).

Dapat dilihat juga dari tabel 4.9, ketika hubung singkat satu fasa terjadi pada bus yang semakin jauh dari gardu induk, maka kedip tegangan yang terjadi semakin kecil. *Error* yang dihasilkan dari pembentukan *database* ini pun kecil, baik sisi tegangan fasa maupun arus fasa. Oleh karena itu *database* yang terbentuk ini dapat digunakan untuk metode penentuan lokasi gangguan.



Tabel 4.10 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk Saat Terjadi Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Setiap Bus

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
1	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,000	0,00	0,00000	7,2166	7,217	0,00368
	C	0,000	0,00	0,00000	7,2168	7,217	0,00148
2	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,219	0,22	0,51249	7,1587	7,159	0,00357
	C	0,185	0,19	2,56936	7,1311	7,131	0,00143
3	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,238	0,24	0,71992	7,1534	7,154	0,00360
	C	0,201	0,20	0,71748	7,1235	7,124	0,00127
4	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,536	0,54	0,78820	7,0707	7,071	0,00347
	C	0,450	0,45	0,04979	7,0071	7,007	0,00155
5	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,571	0,57	0,12606	7,0607	7,061	0,00356
	C	0,479	0,48	0,14349	6,9934	6,994	0,00152
6	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,555	0,56	0,87914	7,0652	7,065	0,00363
	C	0,466	0,47	0,78582	6,9995	7,000	0,00190
7	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,644	0,64	0,56427	7,0397	7,040	0,00364
	C	0,540	0,54	0,03146	6,9648	6,965	0,00186
8	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,671	0,67	0,19442	7,0316	7,032	0,00540
	C	0,563	0,56	0,49734	6,9540	6,954	0,00407
9	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,746	0,75	0,55772	7,0097	7,010	0,00528
	C	0,624	0,62	0,71940	6,9247	6,925	0,00381
10	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,768	0,77	0,23608	7,0031	7,003	0,00385
	C	0,643	0,64	0,46025	6,9160	6,916	0,00187

Tabel 4.10 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk saat Terjadi Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
11	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,803	0,80	0,33959	6,9929	6,993	0,00385
	C	0,671	0,67	0,21882	6,9024	6,903	0,00187
12	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,828	0,83	0,26804	6,9854	6,986	0,00364
	C	0,692	0,69	0,31066	6,8926	6,893	0,00160
13	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	0,924	0,92	0,39247	6,9565	6,957	0,00364
	C	0,771	0,77	0,14206	6,8549	6,855	0,00156
14	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	1,017	1,02	0,30051	6,9279	6,928	0,00396
	C	0,848	0,85	0,26042	6,8182	6,818	0,00188
15	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	1,379	1,38	0,07457	6,8132	6,813	0,00371
	C	1,144	1,14	0,32911	6,6754	6,675	0,00176
16	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	1,451	1,45	0,09527	6,7895	6,790	0,00383
	C	1,203	1,20	0,22418	6,6467	6,647	0,00188
17	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	1,689	1,69	0,06407	6,7101	6,710	0,00387
	C	1,396	1,40	0,31837	6,5524	6,553	0,00185
18	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	1,727	1,73	0,14504	6,6969	6,697	0,00380
	C	1,427	1,43	0,22392	6,5370	6,537	0,00187
19	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	1,765	1,77	0,29017	6,6841	6,684	0,00359
	C	1,457	1,46	0,20096	6,5222	6,522	0,00180
20	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	2,394	2,39	0,15612	6,4586	6,459	0,00358
	C	1,965	1,96	0,24985	6,2696	6,270	0,00171

Tabel 4.10 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk saat Terjadi Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
21	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	2,868	2,87	0,06213	6,2760	6,276	0,00334
	C	2,348	2,35	0,10406	6,0758	6,076	0,00162
22	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	2,910	2,91	0,00877	6,2595	6,260	0,00337
	C	2,381	2,38	0,04537	6,0586	6,059	0,00182
23	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	3,303	3,30	0,08765	6,0992	6,099	0,00351
	C	2,699	2,70	0,03384	5,8951	5,895	0,00201
24	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	3,363	3,36	0,08930	6,0740	6,074	0,00352
	C	2,748	2,75	0,07872	5,8699	5,870	0,00209
25	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	3,391	3,39	0,03636	6,0622	6,062	0,00355
	C	2,771	2,77	0,02695	5,8580	5,858	0,00188
26	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	3,499	3,50	0,02135	6,0163	6,017	0,00347
	C	2,859	2,86	0,05241	5,8123	5,812	0,00212
27	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	3,522	3,52	0,05655	6,0066	6,007	0,00356
	C	2,877	2,88	0,10441	5,8027	5,803	0,00228
28	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	3,558	3,56	0,05635	5,9912	5,991	0,00342
	C	2,906	2,91	0,12757	5,7874	5,788	0,00215

Dapat dilihat dari tabel 4.10 yang merupakan hasil pembentukan *database* tegangan dan arus fasa gardu induk untuk hubung singkat dua fasa ke tanah, bahwa kedip tegangan hanya terjadi pada fasa yang terganggu (fasa B dan C). Arus pada fasa yang tidak terganggu sama dengan nol karena semua arus menuju titik atau fasa yang terganggu. Dari tabel pun dapat ditentukan bahwa *database* tegangan dan arus yang digunakan untuk metode penentuan lokasi gangguan hubung singkat dua

fasa ke tanah adalah *database* tegangan dan arus pada fasa B. Hal ini dikarenakan *error* rata-rata yang muncul pada fasa B lebih kecil dari fasa C, yaitu 0,254379 % berbanding 0,32236 %.

Tabel 4.11 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk saat Terjadi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Setiap Bus

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
1	A	0,000	0,00	0,00000	7,2169	7,217	0,00001
	B	0,000	0,00	0,00000	7,2169	7,217	0,00001
	C	0,000	0,00	0,00000	7,2169	7,217	0,00001
2	A	0,305	0,30	1,53128	7,1583	7,158	0,00003
	B	0,305	0,30	1,53128	7,1583	7,158	0,00003
	C	0,305	0,30	1,53128	7,1583	7,158	0,00003
3	A	0,332	0,33	0,48929	7,1530	7,153	0,00009
	B	0,332	0,33	0,48929	7,1530	7,153	0,00009
	C	0,332	0,33	0,48929	7,1530	7,153	0,00009
4	A	0,747	0,75	0,40743	7,0710	7,071	0,00001
	B	0,747	0,75	0,40743	7,0710	7,071	0,00001
	C	0,747	0,75	0,40743	7,0710	7,071	0,00001
5	A	0,796	0,80	0,51165	7,0612	7,061	0,00002
	B	0,796	0,80	0,51165	7,0612	7,061	0,00002
	C	0,796	0,80	0,51165	7,0612	7,061	0,00002
6	A	0,774	0,77	0,52023	7,0656	7,066	0,00025
	B	0,774	0,77	0,52023	7,0656	7,066	0,00025
	C	0,774	0,77	0,52023	7,0656	7,066	0,00025
7	A	0,898	0,90	0,21707	7,0407	7,041	0,00019
	B	0,898	0,90	0,21707	7,0407	7,041	0,00019
	C	0,898	0,90	0,21707	7,0407	7,041	0,00019
8	A	0,937	0,94	0,33166	7,0328	7,033	0,00017
	B	0,937	0,94	0,33166	7,0328	7,033	0,00017
	C	0,937	0,94	0,33166	7,0328	7,033	0,00017
9	A	1,041	1,04	0,14248	7,0115	7,012	0,00004
	B	1,041	1,04	0,14248	7,0115	7,012	0,00004
	C	1,041	1,04	0,14248	7,0115	7,012	0,00004

Tabel 4.11 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk saat Terjadi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
10	A	1,073	1,07	0,27144	7,0051	7,005	0,00023
	B	1,073	1,07	0,27144	7,0051	7,005	0,00023
	C	1,073	1,07	0,27144	7,0051	7,005	0,00023
11	A	1,121	1,12	0,12952	6,9952	6,995	0,00023
	B	1,121	1,12	0,12952	6,9952	6,995	0,00023
	C	1,121	1,12	0,12952	6,9952	6,995	0,00023
12	A	1,157	1,16	0,28486	6,9880	6,988	0,00009
	B	1,157	1,16	0,28486	6,9880	6,988	0,00009
	C	1,157	1,16	0,28486	6,9880	6,988	0,00009
13	A	1,292	1,29	0,12753	6,9601	6,960	0,00015
	B	1,292	1,29	0,12753	6,9601	6,960	0,00015
	C	1,292	1,29	0,12753	6,9601	6,960	0,00015
14	A	1,423	1,42	0,23254	6,9327	6,933	0,00039
	B	1,423	1,42	0,23254	6,9327	6,933	0,00039
	C	1,423	1,42	0,23254	6,9327	6,933	0,00039
15	A	1,936	1,94	0,18162	6,8238	6,824	0,00060
	B	1,936	1,94	0,18162	6,8238	6,824	0,00060
	C	1,936	1,94	0,18162	6,8238	6,824	0,00060
16	A	2,040	2,04	0,01921	6,8015	6,801	0,00044
	B	2,040	2,04	0,01921	6,8015	6,801	0,00044
	C	2,040	2,04	0,01921	6,8015	6,801	0,00044
17	A	2,379	2,38	0,03563	6,7270	6,727	0,00046
	B	2,379	2,38	0,03563	6,7270	6,727	0,00046
	C	2,379	2,38	0,03563	6,7270	6,727	0,00046
18	A	2,434	2,43	0,18413	6,7147	6,715	0,00056
	B	2,434	2,43	0,18413	6,7147	6,715	0,00056
	C	2,434	2,43	0,18413	6,7147	6,715	0,00056
19	A	2,488	2,49	0,07526	6,7028	6,703	0,00054
	B	2,488	2,49	0,07526	6,7028	6,703	0,00054
	C	2,488	2,49	0,07526	6,7028	6,703	0,00054

Tabel 4.11 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk saat Terjadi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
20	A	3,399	3,40	0,03546	6,4942	6,494	0,00056
	B	3,399	3,40	0,03546	6,4942	6,494	0,00056
	C	3,399	3,40	0,03546	6,4942	6,494	0,00056
21	A	4,097	4,10	0,08190	6,3269	6,327	0,00061
	B	4,097	4,10	0,08190	6,3269	6,327	0,00061
	C	4,097	4,10	0,08190	6,3269	6,327	0,00061
22	A	4,158	4,16	0,04341	6,3118	6,312	0,00049
	B	4,158	4,16	0,04341	6,3118	6,312	0,00049
	C	4,158	4,16	0,04341	6,3118	6,312	0,00049
23	A	4,745	4,74	0,10370	6,1655	6,165	0,00028
	B	4,745	4,74	0,10370	6,1655	6,165	0,00028
	C	4,745	4,74	0,10370	6,1655	6,165	0,00028
24	A	4,835	4,84	0,09762	6,1425	6,143	0,00023
	B	4,835	4,84	0,09762	6,1425	6,143	0,00023
	C	4,835	4,84	0,09762	6,1425	6,143	0,00023
25	A	4,878	4,88	0,04552	6,1317	6,132	0,00034
	B	4,878	4,88	0,04552	6,1317	6,132	0,00034
	C	4,878	4,88	0,04552	6,1317	6,132	0,00034
26	A	5,041	5,04	0,01530	6,0899	6,090	0,00025
	B	5,041	5,04	0,01530	6,0899	6,090	0,00025
	C	5,041	5,04	0,01530	6,0899	6,090	0,00025
27	A	5,075	5,08	0,09537	6,0810	6,081	0,00008
	B	5,075	5,08	0,09537	6,0810	6,081	0,00008
	C	5,075	5,08	0,09537	6,0810	6,081	0,00008
28	A	5,130	5,13	0,00675	6,0670	6,067	0,00023
	B	5,130	5,13	0,00675	6,0670	6,067	0,00023
	C	5,130	5,13	0,00675	6,0670	6,067	0,00023

Berdasarkan hasil pembentukan *database* tegangan dan arus fasa gardu induk atau tabel 4.11, dapat dianalisis bahwa kedip tegangan yang terjadi pada setiap fasa sama besar, begitu juga dengan arusnya dikarenakan hubung singkat tiga fasa ke tanah merupakan gangguan

simetri, dimana tidak menyebabkan ketidakseimbangan pada sistem. Oleh karena itu dapat digunakan nilai fasa apapun untuk metode penentuan lokasi gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah. Hal ini didukung juga oleh *error* yang muncul bernilai kecil.

Tabel 4.12 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk Saat Terjadi Hubung Singkat Antar Fasa pada Setiap Bus

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
1	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,773	5,77	0,05630	6,2498	6,250	0,00293
	C	5,773	5,77	0,05630	6,2498	6,250	0,00293
2	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,902	5,90	0,03627	6,1991	6,199	0,00289
	C	5,646	5,65	0,07924	6,1991	6,199	0,00289
3	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	5,914	5,91	0,05969	6,1945	6,195	0,00284
	C	5,634	5,63	0,07738	6,1945	6,195	0,00284
4	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,088	6,09	0,03921	6,1235	6,124	0,00292
	C	5,466	5,47	0,06716	6,1235	6,124	0,00292
5	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,108	6,11	0,03246	6,1150	6,115	0,00296
	C	5,447	5,45	0,05532	6,1150	6,115	0,00296
6	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,099	6,10	0,01815	6,1188	6,119	0,00318
	C	5,456	5,46	0,08015	6,1188	6,119	0,00318
7	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,151	6,15	0,00816	6,0972	6,097	0,00312
	C	5,407	5,41	0,05597	6,0972	6,097	0,00312
8	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,167	6,17	0,05466	6,0904	6,091	0,00551
	C	5,392	5,39	0,03485	6,0904	6,091	0,00551
9	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,210	6,21	0,00030	6,0720	6,072	0,00529
	C	5,352	5,35	0,02924	6,0720	6,072	0,00529

Tabel 4.12 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk saat Terjadi Hubung Singkat Antar Fasa pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
10	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,223	6,22	0,04796	6,0664	6,067	0,00325
	C	5,340	5,34	0,00841	6,0664	6,067	0,00325
11	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,243	6,24	0,04888	6,0578	6,058	0,00325
	C	5,321	5,32	0,02034	6,0578	6,058	0,00325
12	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,258	6,26	0,03828	6,0516	6,052	0,00294
	C	5,308	5,31	0,04251	6,0516	6,052	0,00294
13	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,313	6,31	0,05082	6,0275	6,028	0,00289
	C	5,257	5,26	0,05289	6,0275	6,028	0,00289
14	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,367	6,37	0,04284	6,0037	6,004	0,00324
	C	5,209	5,21	0,02322	6,0037	6,004	0,00324
15	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,576	6,58	0,05661	5,9094	5,910	0,00302
	C	5,029	5,03	0,02497	5,9094	5,910	0,00302
16	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,618	6,62	0,03103	5,8901	5,890	0,00319
	C	4,994	4,99	0,08706	5,8901	5,890	0,00319
17	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,754	6,75	0,06444	5,8256	5,826	0,00315
	C	4,886	4,89	0,08895	5,8256	5,826	0,00315
18	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,776	6,78	0,05223	5,8150	5,815	0,00306
	C	4,869	4,87	0,02813	5,8150	5,815	0,00306
19	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	6,798	6,80	0,03132	5,8046	5,805	0,00297
	C	4,852	4,85	0,04774	5,8046	5,805	0,00297



Tabel 4.12 *Database* Tegangan dan Arus Fasa Gardu Induk saat Terjadi Hubung Singkat Antar Fasa pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Fasa	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
20	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	7,157	7,16	0,04695	5,6240	5,624	0,00292
	C	4,606	4,61	0,07817	5,6240	5,624	0,00292
21	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	7,426	7,43	0,05983	5,4791	5,479	0,00270
	C	4,462	4,46	0,05298	5,4791	5,479	0,00270
22	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	7,449	7,45	0,01315	5,4660	5,466	0,00282
	C	4,452	4,45	0,03830	5,4660	5,466	0,00282
23	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	7,671	7,67	0,00810	5,3393	5,339	0,00301
	C	4,368	4,37	0,04736	5,3393	5,339	0,00301
24	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	7,704	7,70	0,05731	5,3194	5,320	0,00305
	C	4,358	4,36	0,04610	5,3194	5,320	0,00305
25	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	7,720	7,72	0,00358	5,3100	5,310	0,00294
	C	4,354	4,35	0,08265	5,3100	5,310	0,00294
26	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	7,781	7,78	0,01188	5,2739	5,274	0,00301
	C	4,338	4,34	0,03622	5,2739	5,274	0,00301
27	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	7,794	7,79	0,04725	5,2662	5,266	0,00318
	C	4,336	4,34	0,10201	5,2662	5,266	0,00318
28	A	11,547	11,55	0,02593	0,0000	0,000	0,00000
	B	7,814	7,81	0,04958	5,2540	5,254	0,00303
	C	4,331	4,33	0,02989	5,2540	5,254	0,00303

Dapat dilihat hasil pembentukan *database* untuk hubung singkat antar fasa yaitu pada tabel 4.12, bahwa kedip tegangan tidak terjadi pada fasa yang tidak terganggu (fasa A), dan juga tidak ada arus yang mengalir pada fasa tersebut dikarenakan semua arus menuju titik atau fasa yang

terganggu. Pada tabel juga dapat ditentukan *database* tegangan dan arus fasa yang digunakan pada metode penentuan lokasi gangguan adalah *database* tegangan dan arus fasa B, dikarenakan *error* rata-rata yang muncul (0,038116 %) lebih kecil dibandingkan pada fasa C (0,052625%). Dapat dilihat pula bahwa semakin jauh lokasi hubung singkat, maka akan semakin kecil pula kedip tegangan pada gardu induk.

#### **4.4 Penentuan Jarak Lokasi Gangguan**

Simulasi penentuan jarak lokasi gangguan pada tugas akhir ini akan diujikan dengan beberapa kasus. Sistem distribusi yang digunakan adalah penyulang tegalsari, dan metode penentuan lokasi gangguan yang digunakan adalah metode pendekatan urutan kedip tegangan. Berikut adalah kasus yang diujikan:

- a. Kasus 1 adalah penentuan jarak lokasi gangguan hubung singkat pada daerah bus 1-2, bus 7-8, bus 15-16, dan bus 20-21. Jenis hubung singkat yaitu hubung singkat satu fasa ke tanah
- b. Kasus 2 adalah penentuan jarak lokasi gangguan hubung singkat pada daerah bus 2-4, bus 14-15, bus 19-20, dan bus 24-26. Jenis hubung singkat yaitu hubung singkat dua fasa ke tanah.
- c. Kasus 3 adalah penentuan jarak lokasi gangguan hubung singkat pada daerah bus 6-7, bus 10-11, bus 16-17, dan bus 22-23. Jenis hubung singkat yaitu hubung singkat tiga fasa ke tanah.
- d. Kasus 4 adalah penentuan jarak lokasi gangguan hubung singkat pada daerah bus 7-10, bus 13-14, bus 17-19, dan bus 20-21. Jenis hubung singkat yaitu hubung singkat antar fasa.

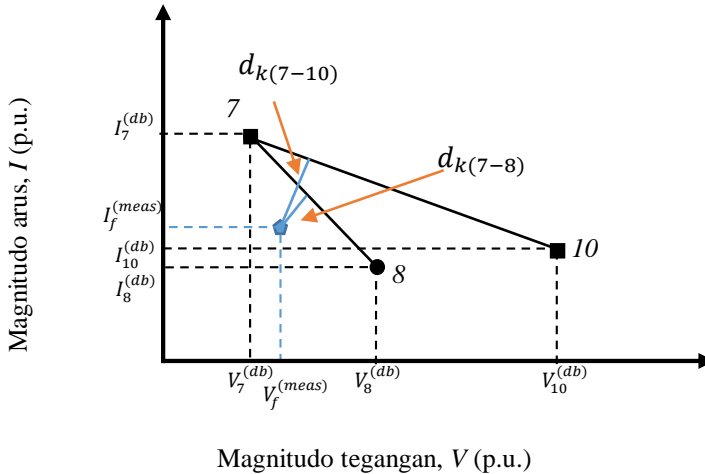
##### **4.4.1 Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Kasus 1**

Metode penentuan jarak lokasi gangguan menggunakan metode pendekatan urutan kedip tegangan memerlukan *database* tegangan dan arus fasa pada gardu induk yang telah dilakukan pada subbab 4.3. Pada kasus 1, *database* yang digunakan adalah *database* pada tabel 4.9. Selain itu, diperlukan pula data tegangan dan arus fasa terukur pada GI. Data ini didapat dengan melakukan simulasi hubung singkat menggunakan ETAP pada suatu titik diantara bus yang telah ditentukan (pada kasus ini bus 1-2, bus 7-8, bus 15-16, dan bus 20-21).

Sebagai contoh perhitungan jarak lokasi gangguan kasus ini, dilakukan simulasi hubung singkat pada daerah antara bus 7-8 dengan

jarak 10 meter dari bus 7. Berikut langkah-langkah penentuan jarak lokasi gangguan:

- Hasil dari ETAP didapatkan tegangan gardu induk sebesar  $V_f^{(meas)} = 0,673$  kV, dan arus sebesar  $I_f^{(meas)} = 6,953$  kA.
- Ketika dibandingkan dengan *database* tegangan dan arus yang terbentuk, nilai itu berada diantara bus 7-8, dan bus 7-10.
- Nilai tegangan dan arus fasa yang terbentuk pada *database* tersebut adalah  $V_7^{(db)} = 0,648$  kV,  $V_8^{(db)} = 0,675$  kV,  $V_{10}^{(db)} = 0,772$  kV,  $I_7^{(db)} = 6,963$  kA,  $I_8^{(db)} = 6,952$  kA,  $I_{10}^{(db)} = 6,913$  kA.
- Kemudian akan dicari urutan kedip tegangan antara kedua kemungkinan daerah tersebut. Sebagai ilustrasi, pembentukan urutan kedip tegangan ini akan dijelaskan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Konsep Pendekatan Urutan Kedip Tegangan

- Mengurutkan kedip tegangan dilakukan dengan membandingkan nilai  $d_{k(7-8)}$  dengan  $d_{k(7-10)}$ , dimana nilai terkecil akan diletakkan sebagai urutan pertama. Untuk menghitungnya, digunakan persamaan (2.33), dimana nilai  $V_r^{(calc)}$  dan  $I_r^{(calc)}$  dapat dicari menggunakan persamaan (2.34) dan persamaan (2.39). Nilai  $V_r^{(calc)}$  dan  $I_r^{(calc)}$  untuk kemungkinan pertama yang didapat

adalah 0,66906 dan 6,95298, dan untuk kemungkinan kedua didapat nilai sebesar 0,66901 dan 6,95294. Sehingga didapatkan nilai  $d_{k(7-8)}$  dan  $d_{k(7-10)}$  sebesar 0,0034982 dan 0,0035436 secara berurutan. Dari hasil tersebut, dapat ditentukan bahwa urutan pertama diisi oleh kemungkinan daerah bus 7-8, kemudian urutan kedua adalah kemungkinan daerah bus 7-10.

- vi. Setelah didapat urutan kedip tegangan, akan dilakukan perhitungan jarak lokasi gangguan dalam satuan meter dengan menggunakan persamaan (2.45), dimana nilai  $df$  dan  $l_{p-q}$  didapat dari persamaan (2.46) dan persamaan (2.47). Jarak lokasi gangguan didapat sebesar 8,30137 meter untuk kemungkinan pertama, dan 8,3253 meter untuk kemungkinan kedua.

Terdapat selisih jarak antara hasil perhitungan dengan hasil simulasi menggunakan ETAP, ini yang akan dibentuk sebagai nilai *error*. Perhitungan ini dilakukan juga pada daerah bus 1-2 dengan jarak 50 meter, daerah bus 15-16 dengan jarak 15 meter, dan pada daerah bus 20-21 dengan jarak 150 meter, dimana semua jarak dihitung dari bus awal setiap daerah. Tabel 4.13 menunjukkan hasil yang didapat dari penentuan jarak lokasi gangguan pada kasus ini.

Tabel 4.13 Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah (Kasus 1)

Bus Uji	Jarak Aktual (meter)	Prediksi Bus	Urutan	$d_k$	Jarak Metode (meter)	Error (%)
1-2	50	1-2	1	0,01754	42,395	9,13781
7-8	10	7-8	1	0,00350	8,301	0,65189
		7-10	2	0,00354	8,325	0,55901
15-16	15	15-16	1	0,00532	12,102	0,49411
20-21	175	20-21	1	0,06691	129,829	3,56659

Dapat dilihat dari tabel 4.13, bahwa hasil penentuan lokasi menunjukkan ketepatan yang tinggi, dengan rata-rata *error* sebesar 3,4626%. Dapat dianalisa juga berdasarkan hasil pada tabel, bahwa semakin besar nilai  $d_k$  maka akan semakin besar pula nilai *error*. Hal ini dipengaruhi oleh jarak gangguan dari bus awal dari suatu daerah gangguan. Hasil uji pada kasus ini pun menunjukkan tidak ada yang salah pada urutan pertama, dimana

pada tabel terdapat baris yang berwarna abu-abu merupakan hasil uji yang salah.

#### 4.4.2 Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Kasus 2

Secara konsep, penentuan jarak lokasi gangguan pada kasus ini sama dengan penentuan jarak lokasi gangguan pada kasus 1. Akan tetapi, *database* yang digunakan pada kasus ini adalah *database* tegangan dan arus fasa pada gardu induk saat terjadi gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah. Untuk menentukan tegangan dan arus gardu induk terukur masih menggunakan hasil simulasi pada ETAP.

Sebagai contoh perhitungan jarak lokasi gangguan kasus ini, dilakukan simulasi hubung singkat pada daerah antara bus 24-26 dengan jarak 10 meter dari bus 24. Berikut langkah-langkah penentuan jarak lokasi gangguan:

- i. Hasil dari ETAP didapatkan tegangan gardu induk sebesar  $V_f^{(meas)} = 3,38$  kV, dan arus sebesar  $I_f^{(meas)} = 6,067$  kA.
- ii. Ketika dibandingkan dengan *database* tegangan dan arus yang terbentuk, nilai itu berada diantara bus 24-25, dan bus 24-26.
- iii. Nilai tegangan dan arus fasa yang terbentuk pada *database* tersebut adalah  $V_{24}^{(db)} = 3,363$  kV,  $V_{25}^{(db)} = 3,391$  kV,  $V_{26}^{(db)} = 3,499$  kV,  $I_{24}^{(db)} = 6,074$  kA,  $I_{25}^{(db)} = 6,062$  kA,  $I_{26}^{(db)} = 6,016$  kA.
- iv. Mengurutkan kedip tegangan dilakukan dengan membandingkan nilai  $d_{k(24-25)}$  dengan  $d_{k(24-26)}$ , dimana nilai terkecil akan diletakkan sebagai urutan pertama. Untuk menghitungnya, digunakan persamaan (2.33), dimana nilai  $V_r^{(calc)}$  dan  $I_r^{(calc)}$  dapat dicari menggunakan persamaan (2.34) dan persamaan (2.39). Nilai  $V_r^{(calc)}$  dan  $I_r^{(calc)}$  untuk kemungkinan pertama yang didapat adalah 3,37774 dan 6,06674, dan untuk kemungkinan kedua didapat nilai sebesar 3,37769 dan 6,06670. Sehingga didapatkan nilai  $d_{k(7-8)}$  dan  $d_{k(7-10)}$  sebesar 0,002614 dan 0,002661 secara berurutan. Dari hasil tersebut, dapat ditentukan bahwa urutan pertama diisi oleh kemungkinan daerah bus 24-25, kemudian urutan kedua adalah kemungkinan daerah bus 24-26.
- v. Setelah didapat urutan kedip tegangan, akan dilakukan perhitungan jarak lokasi gangguan dalam satuan meter dengan menggunakan persamaan (2.45), dimana nilai  $df$  dan  $l_{p-q}$  didapat dari persamaan (2.46) dan persamaan (2.47). Jarak lokasi

gangguan didapat sebesar 8,14134 meter untuk kemungkinan pertama, dan 8,17944 meter untuk kemungkinan kedua.

- vi. Akan tetapi ternyata urutan pertama bukanlah daerah terganggu sesungguhnya, akan tetapi urutan kedua yang merupakan daerah terganggu.

Terdapat selisih jarak antara hasil perhitungan dengan hasil simulasi menggunakan ETAP, ini yang akan dibentuk sebagai nilai *error*. Perhitungan ini dilakukan juga pada daerah bus 2-4 dengan jarak 70 meter, daerah bus 14-15 dengan jarak 100 meter, dan pada daerah bus 19-20 dengan jarak 200 meter. Tabel 4.14 menunjukkan hasil yang didapat dari penentuan jarak lokasi gangguan pada kasus ini.

Tabel 4. 14 Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah (Kasus 2)

Bus Uji	Jarak Aktual (meter)	Prediksi Bus	Urutan	$d_k$	Jarak Metode (meter)	Error (%)
2-4	70	2-4	1	0,01329	64,828	2,50291
14-15	100	14-15	1	0,02255	90,029	1,79637
19-20	200	19-20	1	0,05562	172,270	2,70884
24-26	10	24-25	1	0,00261	8,141	0,11945
		24-26	2	0,00266	8,179	0,11245

Berdasarkan tabel 4.14 yang merupakan hasil penentuan lokasi gangguan untuk kasus 2, dapat dilihat bahwa semakin besar nilai  $d_k$  maka akan semakin besar pula nilai *error*. Rata-rata *error* pada kasus 2 lebih kecil dibanding kasus 1, yaitu sebesar 1,7801%. Pada kasus 2 ini, terdapat satu pengujian yang memiliki hasil uji benar pada urutan kedua.

#### 4.4.3 Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Kasus 3

Jenis gangguan pada kasus 3 merupakan gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah. Bus uji dilakukan pada bus 6-7, bus 10-11, bus 16-17, dan bus 22-23. Oleh karena itu, pada kasus ini *database* tegangan dan arus yang digunakan adalah *database* tegangan dan arus fasa gardu induk saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah, atau pada tabel 4.11.

Sebagai contoh perhitungan jarak lokasi gangguan kasus ini, dilakukan simulasi hubung singkat pada daerah antara bus 10-11 dengan jarak 10 meter dari bus 10. Berikut langkah-langkah penentuan jarak lokasi gangguan:

- i. Hasil dari ETAP didapatkan tegangan gardu induk sebesar  $V_f^{(meas)} = 1,11$  kV, dan arus sebesar  $I_f^{(meas)} = 6,7$  kA.
- ii. Ketika dibandingkan dengan *database* tegangan dan arus yang terbentuk, nilai itu berada diantara bus 10-11, dan bus 10-12.
- iii. Nilai tegangan dan arus fasa yang terbentuk pada *database* tersebut adalah  $V_{10}^{(db)} = 1,073$  kV,  $V_{11}^{(db)} = 1,121$  kV,  $V_{12}^{(db)} = 1,157$  kV,  $I_{10}^{(db)} = 7,005$  kA,  $I_{11}^{(db)} = 6,995$  kA,  $I_{12}^{(db)} = 6,988$  kA.
- iv. Mengurutkan kedip tegangan dilakukan dengan membandingkan nilai  $d_{k(10-11)}$  dengan  $d_{k(10-12)}$ , dimana nilai terkecil akan diletakkan sebagai urutan pertama. Untuk menghitungnya, digunakan persamaan (2.33), dimana nilai  $V_r^{(calc)}$  dan  $I_r^{(calc)}$  dapat dicari menggunakan persamaan (2.34) dan persamaan (2.39). Nilai  $V_r^{(calc)}$  dan  $I_r^{(calc)}$  untuk kemungkinan pertama yang didapat adalah 1,1062 dan 6,998, dan untuk kemungkinan kedua didapat nilai sebesar 1,10619 dan 6,998. Sehingga didapatkan nilai  $d_{k(10-11)}$  dan  $d_{k(10-12)}$  sebesar 0,001395 dan 0,0014 secara berurutan. Dari hasil tersebut, dapat ditentukan bahwa urutan pertama diisi oleh kemungkinan daerah bus 10-11, kemudian urutan kedua adalah kemungkinan daerah bus 10-12.
- v. Setelah didapat urutan kedip tegangan, akan dilakukan perhitungan jarak lokasi gangguan dalam satuan meter dengan menggunakan persamaan (2.45), dimana nilai  $df$  dan  $l_{p-q}$  didapat dari persamaan (2.46) dan persamaan (2.47). Jarak lokasi gangguan didapat sebesar 9,58379 meter untuk kemungkinan pertama, dan 9,5927 meter untuk kemungkinan kedua.

Terdapat selisih jarak antara hasil perhitungan dengan hasil simulasi menggunakan ETAP, ini yang akan dibentuk sebagai nilai *error*. Perhitungan ini dilakukan juga pada daerah bus 6-7 dengan jarak 10 meter, daerah bus 16-17 dengan jarak 75 meter, dan pada daerah bus 22-23 dengan jarak 100 meter. Tabel 4.15 menunjukkan hasil yang didapat dari penentuan jarak lokasi gangguan pada kasus ini.

Hasil penentuan jarak lokasi gangguan untuk kasus 3 ditunjukkan pada tabel 4.15, dimana didapatkan rata-rata *error* sebesar 0,28802%. Nilai *error* ini lebih kecil diantara nilai *error* pada dua kasus sebelumnya. Hal ini disebabkan nilai  $d_k$  yang kecil dikarenakan nilai tegangan terukur yang lebih akurat. Pada kasus ini semua hasil uji benar berada pada urutan

pertama. Tabel 4. 15 Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah (Kasus 3)

Bus Uji	Jarak Aktual (meter)	Prediksi Bus	Urutan	$d_k$	Jarak Metode (meter)	Error (%)
6-7	10	6-7	1	0,00138	9,618	0,15325
10-11	10	10-11	1	0,00139	9,584	0,13273
		10-12	2	0,00140	9,593	0,12580
16-17	75	16-17	1	0,01141	71,530	0,50163
22-23	100	22-23	1	0,01743	94,513	0,36448

#### 4.4.4 Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Kasus 4

Pada kasus ini terjadi gangguan hubung singkat antar fasa di beberapa titik, yaitu antara bus 7-10, bus 13-14, bus 17-19, dan bus 20-21. Untuk menentukan jarak lokasi gangguan dengan menggunakan metode pendekatan urutan kedip tegangan, digunakan *database* tegangan dan arus fasa pada gardu induk saat terjadi gangguan hubung singkat antar fasa, atau pada tabel 4.12.

Sebagai contoh perhitungan jarak lokasi gangguan kasus ini, dilakukan simulasi hubung singkat pada daerah antara bus 10-11 dengan jarak 10 meter dari bus 10. Berikut langkah-langkah penentuan jarak lokasi gangguan:

- Hasil dari ETAP didapatkan tegangan gardu induk sebesar  $V_f^{(meas)} = 6,35$  kV, dan arus sebesar  $I_f^{(meas)} = 6,01$  kA.
- Ketika dibandingkan dengan *database* tegangan dan arus yang terbentuk, nilai itu hanya berada diantara bus 13-14.
- Nilai tegangan dan arus fasa yang terbentuk pada *database* tersebut adalah  $V_{13}^{(db)} = 6,313$  kV,  $V_{14}^{(db)} = 6,367$  kV,  $I_{13}^{(db)} = 6,0275$  kA,  $I_{14}^{(db)} = 6,0037$  kA.
- Pada kasus ini tidak perlu melakukan pengurutan kedip tegangan karena hanya muncul satu kemungkinan daerah. Akan tetapi, nilai  $d_{k(13-14)}$  tetap dicari untuk perhitungan jarak lokasi gangguan. Untuk menghitungnya, digunakan persamaan (2.33), dimana nilai  $V_r^{(calc)}$  dan  $I_r^{(calc)}$  dapat dicari menggunakan persamaan (2.34) dan persamaan (2.39). Nilai  $V_r^{(calc)}$  dan  $I_r^{(calc)}$  yang didapat adalah 6,34264 dan 6,0121. Sehingga didapatkan nilai  $d_{k(13-14)}$  sebesar 0,005675.



- v. Setelah didapat nilai  $d_{k(13-14)}$ , akan dilakukan perhitungan jarak lokasi gangguan dalam satuan meter dengan menggunakan persamaan (2.45), dimana nilai  $df$  dan  $l_{p-q}$  didapat dari persamaan (2.46) dan persamaan (2.47). Jarak lokasi gangguan didapat sebesar 9,58379 meter untuk kemungkinan pertama, dan 9,5927 meter untuk kemungkinan kedua.

Terdapat selisih jarak antara hasil perhitungan dengan hasil simulasi menggunakan ETAP, ini yang akan dibentuk sebagai nilai *error*. Perhitungan ini dilakukan juga pada daerah bus 7-10 dengan jarak 25 meter, daerah bus 17-19 dengan jarak 15 meter, dan pada daerah bus 20-21 dengan jarak 175 meter. Tabel 4.16 menunjukkan hasil yang didapat dari penentuan jarak lokasi gangguan pada kasus ini.

Tabel 4. 16 Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa (Kasus 4)

Bus Uji	Jarak Aktual (meter)	Prediksi Bus	Urutan	$d_k$	Jarak Metode (meter)	Error (%)
7-10	25	8-9	1	0,00309	11,297	4,71632
		7-10	2	0,00556	20,315	1,56400
13-14	25	13-14	1	0,00568	19,916	1,26596
17-19	15	17-18	1	0,00358	11,203	0,53543
		17-19	2	0,00360	11,211	0,52186
20-21	175	20-21	1	0,04578	114,567	4,77169

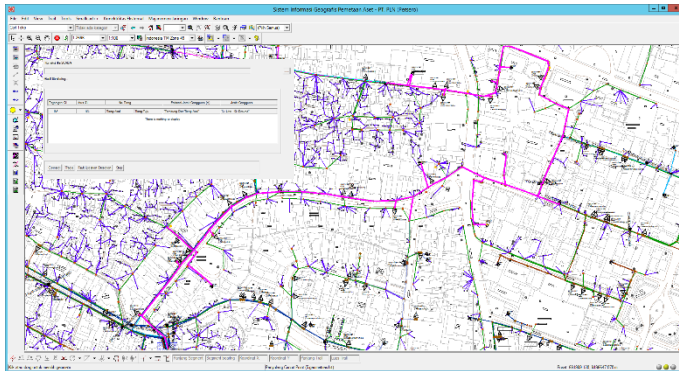
Dapat dilihat dari hasil yang ditunjukkan pada tabel 4.16, bahwa rata-rata *error* pada kasus ini sebesar 2,03088%, nilai ini termasuk yang terbesar dibanding dengan kasus-kasus sebelumnya. Pada kasus ini pula terdapat dua hasil uji benar yang berada pada urutan kedua. Hal ini menunjukkan keakuratan terburuk berada pada metode penentuan jarak lokasi gangguan hubung singkat antar fasa. Hasil lebih lengkapnya dalam penentuan jarak lokasi gangguan dapat dilihat pada lembar lampiran.

#### 4.5 Tampilan Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat di *Geographical Information System* (GIS)

Salah satu keunggulan dari GIS adalah tampilan yang informatif bagi pengguna (*user*). Hal ini dikarenakan pada GIS terdapat data keruangan yang dapat dikombinasi dengan data numerik. Pada tugas akhir

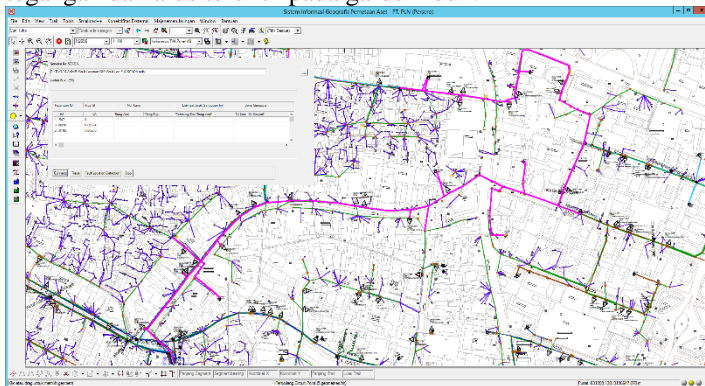
ini, juga dirancang *interface* dari simulasi penentuan jarak lokasi gangguan hubung singkat.

Pada tools dapat dipilih untuk modul penentuan jarak lokasi gangguan, sehingga akan muncul gambar 4.2 pada layar komputer.



Gambar 4.2 Tampilan Awal Penentuan Jarak Lokasi Gangguan pada *Geographical Information System* (GIS)

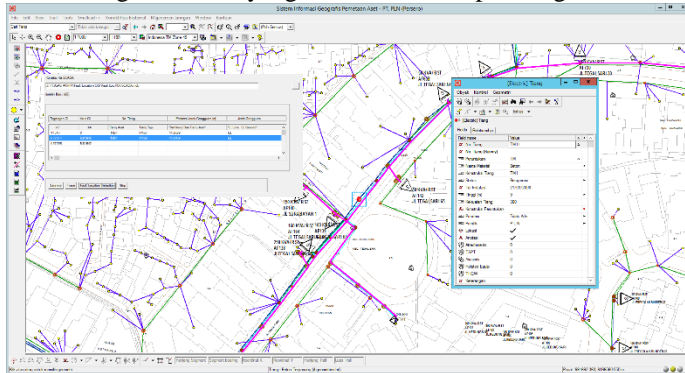
Dapat dilihat dari gambar 4.2, terdapat garis berwarna merah muda yang merupakan jaringan tegangan menengah penyulang tegalsari, dan terdapat *window* penentuan lokasi gangguan. Setelah itu dimasukkan data tegangan dan arus terukur pada gardu induk.



Gambar 4.3 Pemasukkan Data Tegangan dan Arus Gardu Induk pada *GIS*

Pada gambar 4.3 terlihat nilai tegangan dan arus pada gardu induk dimasukkan pada *window* penentuan lokasi gangguan. Harus dimasukkan

nilai ketiga fasa, hal ini bertujuan untuk mengidentifikasi jenis gangguan. Setelah itu dilakukan penentuan jarak lokasi gangguan hubung singkat sesuai dengan metode yang telah dilakukan pada tugas akhir ini.



Gambar 4.4 Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan pada GIS

Gambar 4.4 merupakan hasil penentuan jarak lokasi gangguan, dimana gangguan yang teridentifikasi adalah hubung singkat satu fasa ke tanah di antara tiang TM11 dan TM 12. Pada tampilan diatas terlihat peta menunjukkan titik tiang yang terindikasi sebagai daerah gangguan. Jarak lokasi gangguan terdapat pada *window* penentuan lokasi gangguannya.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil dan analisis yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode perhitungan arus dan tegangan hubung singkat yang diteliti dapat digunakan dalam pembentukan *database* tegangan dan arus gardu induk, dan dapat dijadikan acuan dalam penentuan jarak lokasi gangguan hubung singkat.
2. Penentuan lokasi gangguan hubung singkat menggunakan metode pendekatan urutan kedip tegangan dapat digunakan untuk mengetahui titik lokasi gangguan hubung singkat jenis apapun, beserta jaraknya dengan rata-rata *error* sebesar 1,44031%.
3. Penentuan jarak lokasi gangguan hubung singkat menggunakan metode pendekatan urutan kedip tegangan sangat bergantung dengan ketelitian data terukur pada gardu induk, dan jarak gangguan sesungguhnya dari bus awal.
4. Penentuan jarak lokasi gangguan dengan metode pendekatan urutan kedip tegangan paling efektif untuk jenis hubung singkat tiga fasa ke tanah dengan nilai rata-rata *error* sebesar 0,28802%, dan paling rendah keakuratannya pada jenis hubung singkat satu fasa ke tanah dengan nilai rata-rata *error* 3,46260%.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan untuk pengembangan dan perbaikan simulasi ini adalah:

1. Simulasi penentuan lokasi gangguan hubung singkat yang dikembangkan hanya digunakan untuk sistem distribusi 3 fasa pasif. Penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan modifikasi sistem distribusi 3 fasa aktif.
2. Analisis yang dikembangkan hanya untuk gangguan hubung singkat. Penelitian selanjutnya dapat dikembangkan untuk jenis gangguan selain hubung singkat.

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Mokhlis, H. Y. Li dan A. R. Khalid, "The Application of Voltage Sags Pattern to Locate a Faulted Section in Distribution Network," *International Review of Electrical Engineering*, pp. 173-179, 2010.
- [2] H. Saadat, *Power System Analysis*, USA: McGraw-Hill, 1999.
- [3] Z. Xiangjun, K. K. Li, L. Zhengyi dan Y. Xianggen, "Fault Location Using Travelling Wave for Power Networks," dalam *39th Annual IAS Conference Industry Application*, 2004.
- [4] I. Sadinezhad dan M. Joorabian, "An Adaptive Precise One End Fault Location in Transmission Lines Based on Hybrid Complex Least Error Squares Algorithm and Adaptive Artificial Neural Networks," *International Review of Electrical Engineering*, 2008.
- [5] D. L. L. J. Zhu dan A. A. Girgis, "Automated Fault Location and Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders," *IEEE Trans. Power Delivery*, 2000.
- [6] M. Kezunovic dan Y. Liao, "Fault Location Estimation Based on Matching the Simulated and Recorded Waveforms Using Genetic Algorithms," dalam *7th International Conference on Development in Power System Protection*, 2001.
- [7] R. A. F. Pereira, L. G. W. da Silva, M. Kezunovic dan J. R. S. Mantovani, "Improved Fault Location on Distribution Feeders Based on Matching During Fault Voltage Sags," *IEEE Trans. Power Delivery*, 2009.
- [8] F. Wildan Arif, *Pengembangan Software Analisis Aliran Daya Berbasis Geographical Information System GIS pada Jaringan Distribusi Radial Menggunakan Metode Zbr*, Surabaya: Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS, 2015.
- [9] T. H. Chen dan N. C. Yang, "Three-Phase Power-Flow by Direct Zbr Method for Unbalanced Radial Distribution Systems," dalam *IET Generation Transmission Distribution*, 2009.
- [10] H. Mokhlis, L. J. Awal, A. H. A. Bakar dan H. A. Illias, "Fault Location Estimation Method by Considering Measurement Error for Distribution Networks," *International Trans. Electrical Energy Systems*, 2014.

- [11] G. Derakshan, K. R. Milain, A. Etemad, H. Shayanfar dan U. Sarafriz, "Management and Operation of Electricity Distribution Networks on Geographic Information System," dalam *CIREN*, 2013.

## LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Tegangan dan Arus Urutan saat Terjadi Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Setiap Bus

HS pada Bus	Urutan	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
1	0	3,849	3,85	0,0259	2,4056	2,406	0,00001
	1	7,698	7,7	0,0259	2,4056	2,406	0,00001
	2	3,849	3,85	0,0259	2,4056	2,406	0,00001
2	0	3,878	3,88	0,0621	2,3773	2,377	0,00011
	1	7,712	7,71	0,0296	2,3773	2,377	0,00011
	2	3,835	3,83	0,1237	2,3773	2,377	0,00011
3	0	3,880	3,88	0,0037	2,3747	2,375	0,00017
	1	7,714	7,71	0,0462	2,3747	2,375	0,00017
	2	3,833	3,83	0,0904	2,3747	2,375	0,00017
4	0	3,920	3,92	0,0064	2,3355	2,335	0,00009
	1	7,733	7,73	0,0427	2,3355	2,335	0,00009
	2	3,814	3,81	0,0994	2,3355	2,335	0,00009
5	0	3,924	3,92	0,1137	2,3308	2,331	0,00007
	1	7,736	7,74	0,0563	2,3308	2,331	0,00007
	2	3,811	3,81	0,0382	2,3308	2,331	0,00007
6	0	3,922	3,92	0,0599	2,3329	2,333	0,00018
	1	7,735	7,73	0,0594	2,3329	2,333	0,00018
	2	3,812	3,81	0,0656	2,3329	2,333	0,00018
7	0	3,934	3,93	0,1094	2,3210	2,321	0,00017
	1	7,741	7,74	0,0070	2,3210	2,321	0,00017
	2	3,807	3,81	0,0899	2,3210	2,321	0,00017
8	0	3,938	3,94	0,0495	2,3173	2,317	0,00172
	1	7,742	7,74	0,0311	2,3173	2,317	0,00172
	2	3,805	3,8	0,1242	2,3173	2,317	0,00172
9	0	3,948	3,95	0,0462	2,3072	2,307	0,00155
	1	7,747	7,75	0,0329	2,3072	2,307	0,00155
	2	3,800	3,8	0,0077	2,3072	2,307	0,00155



Lampiran 1. Hasil Tegangan dan Arus Urutan saat Terjadi Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Urutan	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
10	0	3,951	3,95	0,0310	2,3042	2,304	0,00024
	1	7,749	7,75	0,0134	2,3042	2,304	0,00024
	2	3,798	3,8	0,0474	2,3042	2,304	0,00024
11	0	3,956	3,96	0,1026	2,2995	2,300	0,00024
	1	7,751	7,75	0,0169	2,2995	2,300	0,00024
	2	3,796	3,8	0,1088	2,2995	2,300	0,00024
12	0	3,959	3,96	0,0161	2,2961	2,296	0,00008
	1	7,753	7,75	0,0389	2,2961	2,296	0,00008
	2	3,794	3,79	0,1101	2,2961	2,296	0,00008
13	0	3,973	3,97	0,0633	2,2831	2,283	0,00012
	1	7,760	7,76	0,0058	2,2831	2,283	0,00012
	2	3,788	3,79	0,0614	2,2831	2,283	0,00012
14	0	3,985	3,99	0,1158	2,2703	2,270	0,00040
	1	7,766	7,77	0,0521	2,2703	2,270	0,00040
	2	3,781	3,78	0,0348	2,2703	2,270	0,00040
15	0	4,036	4,04	0,1021	2,2199	2,220	0,00022
	1	7,791	7,79	0,0134	2,2199	2,220	0,00022
	2	3,756	3,76	0,0960	2,2199	2,220	0,00022
16	0	4,046	4,05	0,0969	2,2096	2,210	0,00033
	1	7,796	7,8	0,0499	2,2096	2,210	0,00033
	2	3,751	3,75	0,0363	2,2096	2,210	0,00033
17	0	4,080	4,08	0,0058	2,1758	2,176	0,00035
	1	7,813	7,81	0,0364	2,1758	2,176	0,00035
	2	3,735	3,73	0,1273	2,1758	2,176	0,00035
18	0	4,085	4,09	0,1158	2,1702	2,170	0,00042
	1	7,816	7,82	0,0565	2,1702	2,170	0,00042
	2	3,732	3,73	0,0546	2,1702	2,170	0,00042
19	0	4,091	4,09	0,0147	2,1648	2,165	0,00022
	1	7,818	7,82	0,0226	2,1648	2,165	0,00022
	2	3,729	3,73	0,0160	2,1648	2,165	0,00022

Lampiran 1. Hasil Tegangan dan Arus Urutan saat Terjadi Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Urutan	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
20	0	4,181	4,18	0,0342	2,0723	2,072	0,00017
	1	7,863	7,86	0,0430	2,0723	2,072	0,00017
	2	3,685	3,68	0,1243	2,0723	2,072	0,00017
21	0	4,251	4,25	0,0242	2,0000	2,000	0,00004
	1	7,898	7,9	0,0250	2,0000	2,000	0,00004
	2	3,650	3,65	0,0039	2,0000	2,000	0,00004
22	0	4,257	4,26	0,0668	1,9936	1,994	0,00018
	1	7,901	7,9	0,0136	1,9936	1,994	0,00018
	2	3,647	3,65	0,0793	1,9936	1,994	0,00018
23	0	4,315	4,32	0,1065	1,9319	1,932	0,00026
	1	7,930	7,93	0,0014	1,9319	1,932	0,00026
	2	3,618	3,62	0,0496	1,9319	1,932	0,00026
24	0	4,324	4,32	0,1004	1,9224	1,922	0,00033
	1	7,935	7,93	0,0576	1,9224	1,922	0,00033
	2	3,614	3,61	0,1041	1,9224	1,922	0,00033
25	0	4,329	4,33	0,0338	1,9179	1,918	0,00029
	1	7,937	7,94	0,0420	1,9179	1,918	0,00029
	2	3,612	3,61	0,0463	1,9179	1,918	0,00029
26	0	4,345	4,34	0,1066	1,9006	1,901	0,00030
	1	7,945	7,94	0,0591	1,9006	1,901	0,00030
	2	3,604	3,6	0,1019	1,9006	1,901	0,00030
27	0	4,348	4,35	0,0456	1,8969	1,897	0,00041
	1	7,946	7,95	0,0455	1,8969	1,897	0,00041
	2	3,602	3,6	0,0550	1,8969	1,897	0,00041
28	0	4,353	4,35	0,0778	1,8911	1,891	0,00030
	1	7,949	7,95	0,0118	1,8911	1,891	0,00030
	2	3,599	3,6	0,0193	1,8911	1,891	0,00030

Lampiran 2. Hasil Tegangan dan Arus Urutan saat Terjadi Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Setiap Bus

HS pada Bus	Urutan	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
1	0	3,849	3,85	0,02593	2,4056	2,406	0,0000
	1	3,849	3,85	0,02593	4,8113	4,811	0,0000
	2	3,849	3,85	0,02593	2,4056	2,406	0,0000
2	0	3,863	3,86	0,08428	2,3685	2,368	0,0002
	1	3,863	3,86	0,08428	4,7634	4,763	0,0001
	2	3,863	3,86	0,08428	2,3949	2,395	0,0001
3	0	3,865	3,86	0,11715	2,3652	2,365	0,0003
	1	3,865	3,86	0,11715	4,7591	4,759	0,0001
	2	3,865	3,86	0,11715	2,3940	2,394	0,0000
4	0	3,884	3,88	0,10580	2,3142	2,314	0,0002
	1	3,884	3,88	0,10580	4,6926	4,693	0,0001
	2	3,884	3,88	0,10580	2,3785	2,379	0,0001
5	0	3,886	3,89	0,09200	2,3082	2,308	0,0002
	1	3,886	3,89	0,09200	4,6847	4,685	0,0000
	2	3,886	3,89	0,09200	2,3766	2,377	0,0001
6	0	3,885	3,89	0,11863	2,3109	2,311	0,0001
	1	3,885	3,89	0,11863	4,6882	4,688	0,0002
	2	3,885	3,89	0,11863	2,3775	2,377	0,0003
7	0	3,891	3,89	0,03230	2,2956	2,296	0,0002
	1	3,891	3,89	0,03230	4,6681	4,668	0,0002
	2	3,891	3,89	0,03230	2,3727	2,373	0,0002
8	0	3,893	3,89	0,07959	2,2908	2,291	0,0008
	1	3,893	3,89	0,07959	4,6618	4,662	0,0022
	2	3,893	3,89	0,07959	2,3711	2,371	0,0034
9	0	3,898	3,9	0,04992	2,2780	2,278	0,0008
	1	3,898	3,9	0,04992	4,6447	4,645	0,0020
	2	3,898	3,9	0,04992	2,3670	2,367	0,0031
10	0	3,900	3,9	0,01172	2,2741	2,274	0,0002
	1	3,900	3,9	0,01172	4,6395	4,640	0,0003
	2	3,900	3,9	0,01172	2,3657	2,366	0,0003

Lampiran 2. Hasil Tegangan dan Arus Urutan saat Terjadi Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Urutan	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
11	0	3,902	3,9	0,04731	2,2681	2,268	0,0002
	1	3,902	3,9	0,04731	4,6315	4,632	0,0003
	2	3,902	3,9	0,04731	2,3637	2,364	0,0004
12	0	3,904	3,9	0,09017	2,2638	2,264	0,0002
	1	3,904	3,9	0,09017	4,6258	4,626	0,0001
	2	3,904	3,9	0,09017	2,3623	2,362	0,0001
13	0	3,910	3,91	0,00208	2,2471	2,247	0,0003
	1	3,910	3,91	0,00208	4,6035	4,603	0,0000
	2	3,910	3,91	0,00208	2,3568	2,357	0,0002
14	0	3,916	3,92	0,09783	2,2308	2,231	0,0005
	1	3,916	3,92	0,09783	4,5816	4,582	0,0004
	2	3,916	3,92	0,09783	2,3512	2,351	0,0002
15	0	3,940	3,94	0,01235	2,1674	2,167	0,0004
	1	3,940	3,94	0,01235	4,4953	4,495	0,0002
	2	3,940	3,94	0,01235	2,3287	2,329	0,0000
16	0	3,945	3,95	0,11738	2,1546	2,155	0,0004
	1	3,945	3,95	0,11738	4,4778	4,478	0,0003
	2	3,945	3,95	0,11738	2,3239	2,324	0,0002
17	0	3,961	3,96	0,03478	2,1126	2,113	0,0005
	1	3,961	3,96	0,03478	4,4195	4,420	0,0003
	2	3,961	3,96	0,03478	2,3078	2,308	0,0001
18	0	3,964	3,96	0,10049	2,1058	2,106	0,0007
	1	3,964	3,96	0,10049	4,4099	4,410	0,0003
	2	3,964	3,96	0,10049	2,3051	2,305	0,0001
19	0	3,967	3,97	0,08815	2,0992	2,099	0,0004
	1	3,967	3,97	0,08815	4,4006	4,401	0,0001
	2	3,967	3,97	0,08815	2,3025	2,302	0,0001
20	0	4,009	4,01	0,02794	1,9868	1,987	0,0003
	1	4,009	4,01	0,02794	4,2400	4,240	0,0001
	2	4,009	4,01	0,02794	2,2547	2,255	0,0001

Lampiran 2. Hasil Tegangan dan Arus Urutan saat Terjadi Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Urutan	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
21	0	4,041	4,04	0,01691	1,9010	1,901	0,0003
	1	4,041	4,04	0,01691	4,1134	4,113	0,0001
	2	4,041	4,04	0,01691	2,2140	2,214	0,0005
22	0	4,043	4,04	0,08553	1,8935	1,894	0,0005
	1	4,043	4,04	0,08553	4,1021	4,102	0,0000
	2	4,043	4,04	0,08553	2,2102	2,210	0,0004
23	0	4,070	4,07	0,01021	1,8219	1,822	0,0005
	1	4,070	4,07	0,01021	3,9931	3,993	0,0002
	2	4,070	4,07	0,01021	2,1729	2,173	0,0001
24	0	4,074	4,07	0,08745	1,8109	1,811	0,0005
	1	4,074	4,07	0,08745	3,9761	3,976	0,0002
	2	4,074	4,07	0,08745	2,1670	2,167	0,0000
25	0	4,075	4,08	0,11216	1,8057	1,806	0,0005
	1	4,075	4,08	0,11216	3,9681	3,968	0,0001
	2	4,075	4,08	0,11216	2,1641	2,164	0,0002
26	0	4,083	4,08	0,06242	1,7859	1,786	0,0006
	1	4,083	4,08	0,06242	3,9373	3,937	0,0002
	2	4,083	4,08	0,06242	2,1531	2,153	0,0001
27	0	4,084	4,08	0,09911	1,7818	1,782	0,0005
	1	4,084	4,08	0,09911	3,9308	3,931	0,0003
	2	4,084	4,08	0,09911	2,1508	2,151	0,0001
28	0	4,086	4,09	0,08773	1,7752	1,775	0,0005
	1	4,086	4,09	0,08773	3,9204	3,920	0,0002
	2	4,086	4,09	0,08773	2,1471	2,147	0,0001

Lampiran 3. Hasil Tegangan dan Arus Urutan saat Terjadi Hubung Singkat Antar Fasa ke Tanah pada Setiap Bus

HS pada Bus	Urutan	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
1	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,6084	3,608	0,00001
	2	5,774	5,77	0,0607	3,6084	3,608	0,00001
2	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,5791	3,579	0,00003
	2	5,774	5,77	0,0607	3,5791	3,579	0,00003
3	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,5765	3,577	0,00009
	2	5,774	5,77	0,0607	3,5765	3,577	0,00009
4	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,5355	3,536	0,00001
	2	5,774	5,77	0,0607	3,5355	3,536	0,00001
5	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,5306	3,531	0,00001
	2	5,774	5,77	0,0607	3,5306	3,531	0,00001
6	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,5328	3,533	0,00025
	2	5,774	5,77	0,0607	3,5328	3,533	0,00025
7	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,5203	3,520	0,00017
	2	5,774	5,77	0,0607	3,5203	3,520	0,00017
8	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,5164	3,516	0,00259
	2	5,774	5,77	0,0607	3,5164	3,516	0,00259
9	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,5058	3,506	0,00235
	2	5,774	5,77	0,0607	3,5058	3,506	0,00235
10	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,5026	3,503	0,00031
	2	5,774	5,77	0,0607	3,5026	3,503	0,00031

Lampiran 3. Hasil Tegangan dan Arus Urutan saat Terjadi Hubung Singkat Antar Fasa pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Urutan	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
11	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,4976	3,498	0,00031
	2	5,774	5,77	0,0607	3,4976	3,498	0,00031
12	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,4940	3,494	0,00001
	2	5,774	5,77	0,0607	3,4940	3,494	0,00001
13	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,4801	3,480	0,00004
	2	5,774	5,77	0,0607	3,4801	3,480	0,00004
14	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,4664	3,466	0,00032
	2	5,774	5,77	0,0607	3,4664	3,466	0,00032
15	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,4119	3,412	0,00008
	2	5,774	5,77	0,0607	3,4119	3,412	0,00008
16	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,4007	3,401	0,00027
	2	5,774	5,77	0,0607	3,4007	3,401	0,00027
17	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,3635	3,364	0,00022
	2	5,774	5,77	0,0607	3,3635	3,364	0,00022
18	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,3574	3,357	0,00014
	2	5,774	5,77	0,0607	3,3574	3,357	0,00014
19	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,3514	3,351	0,00003
	2	5,774	5,77	0,0607	3,3514	3,351	0,00003
20	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,2471	3,247	0,00001
	2	5,774	5,77	0,0607	3,2471	3,247	0,00001

Lampiran 3. Hasil Tegangan dan Arus Urutan saat Terjadi Hubung Singkat Antar Fasa pada Setiap Bus (Lanjutan)

HS pada Bus	Urutan	Tegangan			Arus		
		Hasil Metode (kV)	Hasil ETAP (kV)	Error (%)	Hasil Metode (kA)	Hasil ETAP (kA)	Error (%)
21	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,1634	3,163	0,00021
	2	5,774	5,77	0,0607	3,1634	3,163	0,00021
22	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,1559	3,156	0,00012
	2	5,774	5,77	0,0607	3,1559	3,156	0,00012
23	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,0827	3,083	0,00006
	2	5,774	5,77	0,0607	3,0827	3,083	0,00006
24	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,0713	3,071	0,00013
	2	5,774	5,77	0,0607	3,0713	3,071	0,00013
25	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,0658	3,066	0,00001
	2	5,774	5,77	0,0607	3,0658	3,066	0,00001
26	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,0449	3,045	0,00009
	2	5,774	5,77	0,0607	3,0449	3,045	0,00009
27	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,0405	3,041	0,00026
	2	5,774	5,77	0,0607	3,0405	3,041	0,00026
28	0	0,000	0,00	0,0000	0,0000	0,000	0,00000
	1	5,774	5,77	0,0607	3,0335	3,033	0,00009
	2	5,774	5,77	0,0607	3,0335	3,033	0,00009



Lampiran 4. Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah Semua Bus

Bus Uji	Jarak Aktual (meter)	Prediksi Bus	Urutan	$d_k$	Jarak Metode (meter)	Error (%)
1 2	50	1 2	1	0,01754	42,3946	0,4312
2 3	5	2 3	1	0,001724	4,2172	0,0444
		2 4	2	0,001831	4,2352	0,2401
2 4	70	2 4	1	0,025415	58,7190	0,6396
4 5	5	4 6	1	0,001744	4,1693	0,0471
		4 5	2	0,001746	4,1717	0,2365
4 6	5	4 6	1	0,001744	4,1693	0,0471
		4 5	2	0,001746	4,1717	0,2365
6 7	10	6 7	1	0,003515	8,3453	0,0938
7 8	10	7 8	1	0,003498	8,3014	0,0963
		7 10	2	0,003544	8,3253	0,4720
8 9	15	8 9	1	0,005275	12,4493	0,1446
		7 10	2	0,00922	21,6591	1,2280
7 10	25	8 9	1	0,004896	11,5549	0,7623
		7 10	2	0,00884	20,7656	1,1773
10 11	10	10 11	1	0,003511	8,2643	0,0984
		10 12	2	0,003521	8,2716	0,4690
10 12	10	10 11	1	0,003511	8,2643	0,0984
		10 12	2	0,003521	8,2716	0,4690
12 13	10	12 13	1	0,003542	8,2617	0,0986
13 14	25	13 14	1	0,008848	20,5283	0,2535
14 15	100	14 15	1	0,037481	80,8912	1,0834
15 16	15	15 16	1	0,005322	12,1018	0,1643
16 17	75	16 17	1	0,027223	59,8985	0,8562
17 18	10	17 18	1	0,003532	7,9556	0,1159
		17 19	2	0,003547	7,9666	0,4517
17 19	15	17 18	1	0,005294	11,9238	0,1744
		17 19	2	0,005316	11,9403	0,6770
19 20	200	19 20	1	0,083141	150,8140	2,7886
20 21	175	20 21	1	0,066911	129,8291	2,5610
21 22	10	21 22	1	0,003412	7,4903	0,1423
22 23	100	22 23	1	0,036617	73,2571	1,5162

Lampiran 4. Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah Semua Bus (Lanjutan)

Bus Uji	Jarak Aktual (meter)	Prediksi Bus	Urutan	$d_k$	Jarak Metode (meter)	Error (%)
23 24	15	23 24	1	0,004997	10,9373	0,2303
24 25	10	24 25	1	0,003311	7,2580	0,1555
		24 26	2	0,003358	7,2829	0,4129
24 26	10	24 25	1	0,003311	7,2580	0,1555
		24 26	2	0,003358	7,2829	0,4129
26 27	5	26 27	1	0,00164	3,5975	0,0795
27 28	10	27 28	1	0,003276	7,1827	0,1597

Lampiran 5. Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah Semua Bus

Bus Uji	Jarak Aktual (meter)	Prediksi Bus	Urutan	$d_k$	Jarak Metode (meter)	Error (%)
1 2	50	1 2	1	0,008746	46,5817	0,1938
2 3	5	2 3	1	0,000887	4,6328	0,02082
		2 4	2	0,000953	4,6672	0,26461
2 4	70	2 4	1	0,013287	64,8285	0,2932
4 5	5	4 6	1	0,000954	4,5892	0,02329
		4 5	2	0,000956	4,5915	0,26032
4 6	5	4 6	1	0,000954	4,5892	0,02329
		4 5	2	0,000956	4,5915	0,26032
6 7	10	6 7	1	0,001939	9,1873	0,04607
7 8	10	7 8	1	0,001953	9,1444	0,04851
		7 10	2	0,001989	9,1722	0,52002
8 9	15	8 9	1	0,002968	13,7169	0,07275
		7 10	2	0,005179	23,8721	1,35343
7 10	25	8 9	1	0,002755	12,7310	0,69559
		7 10	2	0,004965	22,8867	1,29756
10 11	10	10 11	1	0,002004	9,1103	0,05044
		10 12	2	0,002012	9,1181	0,51695
10 12	10	10 11	1	0,002004	9,1103	0,05044
		10 12	2	0,002012	9,1181	0,51695

Lampiran 5. Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah Semua Bus (Lanjutan)

Bus Uji	Jarak Aktual (meter)	Prediksi Bus	Urutan	$d_k$	Jarak Metode (meter)	Error (%)
12 13	10	12 13	1	0,002049	9,1114	0,05038
13 14	25	13 14	1	0,005201	22,6609	0,13261
14 15	100	14 15	1	0,022552	90,0287	0,56532
15 16	15	15 16	1	0,003349	13,3933	0,09109
16 17	75	16 17	1	0,017426	66,5618	0,47841
17 18	10	17 18	1	0,002316	8,8207	0,06686
		17 19	2	0,00233	8,8337	0,50083
17 19	15	17 18	1	0,003471	13,2216	0,10082
		17 19	2	0,003492	13,2412	0,75071
19 20	200	19 20	1	0,05562	172,2701	1,57215
20 21	175	20 21	1	0,048366	147,2849	1,57131
21 22	10	21 22	1	0,002567	8,3715	0,09233
22 23	100	22 23	1	0,027934	82,9591	0,96614
23 24	15	23 24	1	0,003928	12,2653	0,15505
24 25	10	24 25	1	0,002614	8,1413	0,10538
		24 26	2	0,002661	8,1794	0,46373
24 26	10	24 25	1	0,002614	8,1413	0,10538
		24 26	2	0,002661	8,1794	0,46373
26 27	5	26 27	1	0,001311	4,0393	0,05447
27 28	10	27 28	1	0,002626	8,0668	0,1096

Lampiran 6. Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah Semua Bus

Bus Uji	Jarak Aktual (meter)	Prediksi Bus	Urutan	$d_k$	Jarak Metode (meter)	Error (%)
1 2	50	1 2	1	0,006665	48,2709	0,09803
2 3	5	2 3	1	0,000661	4,8116	0,01068
		2 4	2	0,000703	4,8551	0,27526
2 4	70	2 4	1	0,009804	67,5295	0,14006
4 5	5	4 6	1	0,000682	4,8002	0,01133
		4 5	2	0,000684	4,8029	0,2723

Lampiran 6 Lanjutan

Bus Uji	Jarak Aktual (meter)	Prediksi Bus	Urutan	$d_k$	Jarak Metode (meter)	Error (%)
4 6	5	4 6	1	0,000682	4,8002	0,01133
		4 5	2	0,000684	4,8029	0,2723
6 7	10	6 7	1	0,001379	9,6177	0,02168
7 8	10	7 8	1	0,001379	9,5905	0,02321
		7 10	2	0,001398	9,6235	0,5456
8 9	15	8 9	1	0,002085	14,3997	0,03403
		7 10	2	0,003642	25,0561	1,42056
7 10	25	8 9	1	0,001935	13,3645	0,65968
		7 10	2	0,003491	24,0212	1,36189
10 11	10	10 11	1	0,001395	9,5838	0,0236
		10 12	2	0,0014	9,5927	0,54386
10 12	10	10 11	1	0,001395	9,5838	0,0236
		10 12	2	0,0014	9,5927	0,54386
12 13	10	12 13	1	0,001414	9,6011	0,02262
13 14	25	13 14	1	0,003558	23,9452	0,0598
14 15	100	14 15	1	0,015303	95,7799	0,23926
15 16	15	15 16	1	0,002206	14,3199	0,03856
16 17	75	16 17	1	0,011419	71,5298	0,19674
17 18	10	17 18	1	0,001496	9,5134	0,02759
		17 19	2	0,001503	9,5290	0,54025
17 19	15	17 18	1	0,002242	14,2621	0,04183
		17 19	2	0,002253	14,2854	0,80991
19 20	200	19 20	1	0,036626	189,5753	0,59103
20 21	175	20 21	1	0,030762	165,0121	0,56627
21 22	10	21 22	1	0,00158	9,4096	0,03347
22 23	100	22 23	1	0,017434	94,5134	0,31106
23 24	15	23 24	1	0,0024	14,0563	0,0535
24 25	10	24 25	1	0,001596	9,3523	0,03672
		24 26	2	0,001626	9,4109	0,53355
24 26	10	24 25	1	0,001596	9,3523	0,03672
		24 26	2	0,001626	9,4109	0,53355
26 27	5	26 27	1	0,000799	4,6701	0,0187
27 28	10	27 28	1	0,001601	9,3399	0,03742

Lampiran 7. Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa Semua Bus

Bus Uji	Jarak Aktual (meter)	Prediksi Bus	Urutan	$d_k$	Jarak Metode (meter)	Error (%)
1 2	50	1 2	1	0,010505	42,0991	0,44794
2 3	5	2 3	1	0,001053	4,1689	0,04712
		2 4	2	0,001102	4,1946	0,23781
2 4	70	2 4	1	0,015296	58,1485	0,67192
4 5	5	4 6	1	0,001089	4,0925	0,05145
		4 5	2	0,00109	4,0943	0,23213
4 6	5	4 6	1	0,001089	4,0925	0,05145
		4 5	2	0,00109	4,0943	0,23213
6 7	10	6 7	1	0,002198	8,1839	0,10296
7 8	10	7 8	1	0,0022	8,1252	0,10629
		7 10	2	0,002228	8,1448	0,46177
8 9	15	8 9	1	0,003326	12,1717	0,16035
		7 10	2	0,005796	21,1886	1,20129
7 10	25	8 9	1	0,003087	11,2972	0,77688
		7 10	2	0,005557	20,3146	1,15174
10 11	10	10 11	1	0,002228	8,0604	0,10996
		10 12	2	0,002235	8,0658	0,45729
10 12	10	10 11	1	0,002228	8,0604	0,10996
		10 12	2	0,002235	8,0658	0,45729
12 13	10	12 13	1	0,002257	8,0401	0,11112
13 14	25	13 14	1	0,005675	19,9163	0,28822
14 15	100	14 15	1	0,023685	78,3804	1,22573
15 16	15	15 16	1	0,003525	11,5403	0,19615
16 17	75	16 17	1	0,017993	56,8710	1,02783
17 18	10	17 18	1	0,002392	7,4749	0,14316
		17 19	2	0,002402	7,4802	0,42409
17 19	15	17 18	1	0,003585	11,2030	0,21527
		17 19	2	0,003601	11,2109	0,6356
19 20	200	19 20	1	0,052637	141,7443	3,30282
20 21	175	20 21	1	0,045783	114,5666	3,42628

Lampiran 7. Hasil Penentuan Jarak Lokasi Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa Semua Bus (Lanjutan)

Bus Uji	Jarak Aktual (meter)	Prediksi Bus	Urutan	$d_k$	Jarak Metode (meter)	Error (%)
21 22	10	21 22	1	0,002516	6,3066	0,2094
22 23	100	22 23	1	0,02637	59,8966	2,27367
23 24	15	23 24	1	0,003803	8,4411	0,37186
24 25	10	24 25	1	0,00253	5,5340	0,2532
		24 26	2	0,002564	5,4855	0,311
24 26	10	24 25	1	0,00253	5,5340	0,2532
		24 26	2	0,002564	5,4855	0,311
26 27	5	26 27	1	0,001265	2,6370	0,13397
27 28	10	27 28	1	0,002532	5,2145	0,27132

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

## BIOGRAFI PENULIS



Mohammad Indrawan Gunartono atau biasa dipanggil Indra lahir di Surabaya, 23 September 1995. Penulis merupakan anak kedua dari empat bersaudara. Sejak kecil dia memperoleh pendidikan di Surabaya, mulai dari SD Muhammadiyah 4 Pucang, SMP Negeri 6 Surabaya, hingga SMA Negeri 5 Surabaya. Penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, tepatnya di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro. Penulis menekuni bidang Teknik Sistem Tenaga. Selama perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai aktivitas kemahasiswaan. Selain itu, penulis merupakan salah satu asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik B.103.



--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---